UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CEA IFAC comité español de automática

XXXV Valencia

Jornadas de AUTOMATICA

3-5 de Septiembre 2014

- Libro de Actas -

Actas de las XXXV Jornadas de Automática

3 – 5 de Septiembre de 2014, Valencia

ISBN-13: 978-84-697-0589-6

© Comité Español de Automática (CEA-IFAC)

patrocinadores y expositores

OMRON

MathWorks

ABB

FESTO

SMC
INTERNATIONAL TRAINING

Robotnik

SCHUNK

alecop

NATIONAL INSTRUMENTS

colaboradores

PRODEL S.A. EQUIPAMIENTO DIDACTICO

INFAIMON
SU ASESOR EN VISIÓN ARTIFICIAL

EMPRESARIOS AGRUPADOS

SIEMENS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
etsinf

isa

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ISA Sección Española

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

idf INSTITUTO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

DISCA

ai2 INSTITUTO DE AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

- Comités -

Comité científico
(Directiva de CEA)

César de Prada (UVA) ***Presidente***
Joseba Quevedo Casín (UPC) ***Vicepresidente***
Miguel Ángel Mañanas Villanueva (UPC) ***Secretario***

Comité de Programa

Automar*: Pere Ridao Rodríguez (UdG)*
Bioingeniería*: Javier Pérez Turiel (UVA)*
Control Inteligente*: José Manuel Andujar Márquez (UHU)*
Educación en Automática*: Fabio Gómez Estern (US)*
Ingeniería de Control*: Francesc Xavier Blasco Ferragud (UPV)*
Modelado y Simulación de sistemas dinámicos*: Miguel Ángel Piera Eroles (UAB)*
Robótica: *Pedro J Sanz Valero (UJI)*
Sistemas de Tiempo Real: *Alejandro Alonso Muñoz (UPM)*
Visión por Computador*: Enrique Alegre Gutiérrez (UL)*

Organiza:

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA).

Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (ai2).

Universitat Politècnica de València (UPV).

Comité Organizador:

Javier Sanchis
Juan Fco. Blanes
Pedro Albertos
Miguel Martínez
Alfons Crespo
Angel Valera
Antonio Sala
Jesús Picó
Xavier Blasco
Jose E. Simó
Jose Luís Navarro
Jose Luis Díez
Martín Mellado
Antonio Sanchez
Houcine Hassan
Marina Vallés
Antonio Correcher
Ángel Cuenca
Carlos Ricolfe
Raúl Simarro
Ranko Zotovick
Luís Gracia
Jose Luis Poza

- *Presentación* -

*Me permito reproducir la presentación de las **I Jornadas de Automática**, celebradas en la Universidad Politécnica de Valencia en el año 1977, a las que asistieron un total de **26** participantes:*

"En estas primeras Jornadas de Automática cabe preguntarnos: ¿qué nos anima a organizarlas?,¿qué se pretende con ellas? Las Jornadas de Automática han surgido como una necesidad apremiante de las distintas Cátedras de Automática de las E.T.S.I.I., de estrechar sus relaciones, para conocerse y comprenderse mejor, y para aunar sus esfuerzos en poder ofrecer el máximo beneficio a la sociedad, razón última de su existencia.
Para alcanzar este ambicioso objetivo, las Jornadas de Automática están compuestas de tres partes. La primera de ellas está formada por' un conjunto de ponencias o charlas, que se recogen en esta publicación, estando orientadas a que todos los grupos de las distintas cátedras puedan conocer y comentar los trabajos de los demás, as! coma a difundir al máximo estos trabajos. La segunda, consistente en un conjunto de mesas redondas, tendrá por finalidad fijar las directrices adecuadas en todo lo referente a la docencia e investigación. Para la tercera, dirigida hacia las empresas, se ha previsto una conferencia y una mesa redonda, en deseo de estrechar lazos y abrir un esperanzador diálogo entre le Universidad y la Industria.
Haciéndonos eco del sentir de todos los colaboradores, deseamos que en estas Jornadas de Automática se alcancen las metas propuestas, y que este primer encuentro sea el fruto de una colaboración coordinada de la que cabe esperar mejores frutos..."

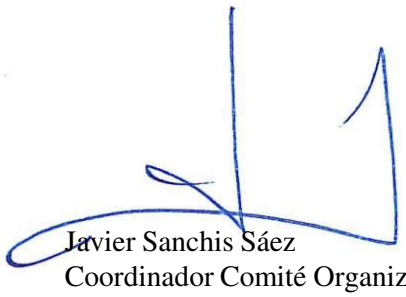
Efectivamente, esos frutos han llegado y hoy, 37 años después y con más de 200 participantes, las jornadas vuelven a la UPV de Valencia con el mismo objetivo y espíritu que las primeras, donde los artículos se escribían a máquina, los ponentes sólo disponían de pizarra para sus presentaciones, y la simulación por computador de sistemas dinámicos era poco más que un sueño.

En esta edición, además de las habituales reuniones de los Grupos Temáticos de CEA, las plenarias y conferencias, hemos abierto las jornadas a empresas del sector para que nos muestren y nos hablen de tendencias y novedades en automatización, robótica, control, equipamiento didáctico, etc.

También este año hemos querido hacer hincapié, a través de una mesa redonda sobre doctorado y un evento posterior relacionado con Spin-Offs, sobre la situación en la que se encuentran nuestros estudiantes de doctorado y el personal investigador en formación. Con una escasa valoración del título de Doctor por parte de las empresas españolas, nuestros futuros doctores están accediendo a oportunidades de trabajo de ámbito internacional. Desde las jornadas queremos fomentar su espíritu emprendedor, también el de profesores e investigadores, mostrándoles algunos casos de éxito de empresas españolas que han surgido de nuestra área de conocimiento y en el seno de la Universidad.

Por otro lado, no quiero olvidar a los profesores que están llegando o han llegado ya a su edad de jubilación. Con toda una trayectoria científica dedicada a la Automática (algunos de ellos asistieron hace 37 años a las primeras jornadas) debe ser un privilegio haber disfrutado, y seguir disfrutando de la evolución que ha experimentado nuestra rama de la ingeniería en todos estos años.

Os invito a disfrutar de este tiempo, de todos los eventos y actividades que hemos organizado, de una forma desinteresada y no con poco esfuerzo. Gracias al Comité Organizador, a los responsables de los Grupos Temáticos, a las entidades colaboradoras, y a las empresas patrocinadoras y expositoras. Gracias a todos los que habéis hecho posible, un año más, estas jornadas.



Javier Sanchis Sáez
Coordinador Comité Organizador
XXXV Jornadas de Automática

Índice de contenidos

Índice de contribuciones

PhotoBioLib: una libreria de Modelica para el modelado y simulacion de fotobiorreactores 3
Agustín Pérez-Castro, José Sánchez, Francisco Gabriel Acién, Ignacio Fernández and José Luis Guzmán

CONTROL DE UN ASCENSOR COMO CASO PRÁCTICO PARA LA DOCENCIA DE CONTROL AVANZADO 11
Adrián Peidró, Arturo Gil, José María Marín, Luís Payá and Óscar Reinoso

Planificación de misiones de vehículos aéreos no tripulados con Fast Marching en un entorno 3D 19
Verónica González Pérez, Concepción Alicia Monje Micharet and Carlos Balaguer

Estudio de la robustez de los metodos de control para exoesqueletos de miembros inferiores 26
Ranko Zotovic Stanisic and Julio Hernando Vargas Riaño

Helicopter Main Rotor Vibration Analysis with Varying Rotating Speed 34
Salvador Castillo-Rivera, Maria Tomas-Rodriguez and G. Nicolas Marichal Plasencia

CLASIFICACIÓN DE CAMBIOS DE DIRECCIÓN DURANTE LA MARCHA MEDIANTE EL USO DE SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS 42
Juan F. Abril, Daniel Planelles, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez and José M. Azorín

MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROLLER BASED ON SLIDING MODE APPROACH 49
Maissa Farhat, Oscar Barambones, Jose A Ramos and Jose M. Gonzalez de Durana

Comparación de estrategias de control multivariable sobre el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia 56
Sergio Fragoso, Francisco VÁzquez, Juan Garrido and Fernando Morilla

Casos de uso y mejoras de un robot humanoide de bajo coste 64
Juan Carlos García Sánchez, Javier Felip León, Carlos Veiga Almagro and Pedro J Sanz

Obtención de los estados de equilibrio de un sistema desconocido mediante su modelado borroso 70
Antonio Javier Barragán Piña, Francisca Segura Manzano, Miguel Ángel Martínez Bohórquez and José Manuel Andújar Márquez

SUPERVISIÓN, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN MULTI-ETAPA 75
Mario L. Ruz, Sergio Fragoso, David Rodriguez, Francisco Vazquez and Miguel Zamora

DETERMINACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE MAPAS DE COBERTURA RASANT EN LA ZONA MARÍTIMA DE CANARIAS 82
J. A. Rodríguez, G. N. Marichal, C. Alonso, I. Padrón and E. Melón

CONTROL FUZZY DE LA VELOCIDAD DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA 88
Jose A. Cortajarena, Oscar Barambones, Patxi Alkorta and Julián De Marcos

Decodificación de la Marcha Humana Mediante Señales EEG 94
Joaquín Alcázar, Andrés Úbeda, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, Jose M. Azorin and José L. Pons

Aplicación de ICA para la Eliminación de Artefactos Oculares y Mandibulares en Señales EEG durante la Realización de Tareas Mentales 100
Belén López, Andrés Úbeda, Daniel Planelles, Carlos Perez-Vidal, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin

Estimación de Altura en Aplicaciones de Navegación Topológicas mediante Apariencia Global de Información Visual 106
Francisco Amorós, Luis Paya, David Valiente, Luis Miguel Jiménez and Oscar Reinoso

SISTEMA DE CONTROL EN RED (SCR) BASADO EN PREDICTOR-OBSERVADOR. ESTUDIO COMPARATIVO CON OTRAS PROPUESTAS DE SCR 114
Angel Cuenca, Pedro García and Pedro Albertos

CONTROL DE LA TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA DE UN FILTRO ACTIVO DE TIPO PARALELO 122
José Carlos Alfonso Gil, Carlos Ariño, Carlos Bernad Viciano, Hector Beltrán and Emilio Pérez

Clasificación de respuestas de pulsos de un ADS por análisis discriminante 130
Fernandez Marron Jose Luis, Blazquez Martinez Juan and Barcala Riveira Jose Miguel

Estimación del par articular generado por Estimulación Eléctrica Neuromuscular mediante un modelo fisiológico simplificado 136
Elisa Piñuela Martín, Antonio J. Del-Ama Espinosa and Ángel Gil Agudo

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES ANTE FALLOS ESPORÁDICOS 144
Manuel Alejandro Hernandez Mejias, Antonio Sala, Andrés Querol and Carlos Ariño

Control predictivo no lineal del confort térmico y calidad de aire 150
María Del Mar Castilla, José Domingo Álvarez, Julio Elias Normey Rico, Francisco Rodríguez and Manuel Berenguel

Diseño de circuitos genéticos en Biología Sintética utilizando optimización multi-objetivo 158
Yadira Boada, Alejandra González, Alejandro Vignoni, Gilberto Reynoso-Meza and Jesús Picó

Estudio de la aplicacion de estimulacion electrica funcional para la mejora del funcionamiento de interfaces cerebro-computadora 166
Inmaculada Ríos, Enrique Hortal, Javier Gimeno, Jose A. Flores and Jose M. Azorin

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA MOTORES BLDC 172
Diego Pérez Losada, Joaquín López Fernández and María Santos Fernández

MODELADO CINEMÁTICO DE UN MANIPULADOR BINARIO HIPER REDUNDANTE PARA APLICACIONES EN CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA (MIS) 179
José Luis González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile, David De La Fuente, Rubén Alonso and Fernando Gayubo

Un método para modelar sistemas no holónomos con rodaduras 186
Francisco Javier Gil-Chica, Manuel Pérez-Polo and Manuel Perez-Molina

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PENDULO MOLAR. APLICACIÓN A LA ESTABILIZACIÓN DE SISTEMAS OSCILATORIOS 191
Manuel Pérez-Molina, Manuel Pérez-Polo and Francisco Javier Gil Chica

MEJORA DEL RENDIMIENTO DE UN REACTOR CONTINUO EN REGIMEN OSCILANTE GENERADO POR CONTROL PI 198
Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica and José Ángel Berná Galiano

CONTROL PID DE UN SERVOMECANISMO NO LINEAL USANDO LA FUNCION DESCRIPTIVA Y LA BIFURCACION DE BOGDANOV-TAKENS 207
Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica and José Ángel Berná Galiano

Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto. 215
Stephan Strahl, Attila Husar, Jordi Riera Colomer and Ramon Costa Castelló

APLICACIONES EN MATLAB Y SIMULINK PARA EL MODELADO Y CONTROL DEL MOVIMIENTO DE UNA ESTACIÓN ABB IRB-120 222
Miguel Mato, Alberto Herreros, Juan Carlos Fraile, José Luis Sanchez, Enrqiue Baeyens, Javier Pérez Turiel and Fernanado Gayubo

DISEÑO DE UN ASISTENTE CAMARÓGRAFO PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA DE PUERTO ÚNICO 228
Irene Rivas Blanco, Belén Estebanez, María Cuevas Rodriguez, Isabel García Morales and Víctor Muñoz

IMPLEMENTACION DE UNA LIBRERIA EN SIMULINK PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR 236
Alberto León, Enrique Hortal, Alberto Rodríguez, José M. Climent, José M. Cano and Jose M. Azorin

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE MERCANCÍAS EN LOGÍSTICA MEDIANTE MÚLTIPLES CÁMARAS DE RANGO 243
Pablo Artaso and Gonzalo López-Nicolás

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO DINÁMICO DE UN CUERPO EN MANIOBRAS DE INMERSIÓN 251
Jose A Somolinos, Amable López, Luis Ramón Núñez and Montserrat Espín

SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA 258
Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, Jesus Fernandez-Lozano and Alfonso García-Cerezo

FLOTA DE VEHÍCULOS AÉREOS PARA FOTOGRAFIA DE ALTA RESOLUCIÓN EN APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISION. PROYECTO RHEA 265
Jaime Del Cerro, João Valente, David Sanz, Leandro Cancar, Claudio Rossi and Antonio Barrientos

Locality-Sensitive Hashing for large scale image retrieval 272
Adrian Sanchez, Enrique Alegre, Victor Gonzalez and Diego Garcia

Tool wear monitoring in milling using aZIBO shape descriptor 279
Maria Teresa Garcia-Ordas, Enrique Alegre, Joaquin Barreiro, Diego Garcia-Ordas and Victor Gonzalez-Castro

Mejorando los sistemas de predicción basados en error acotado 286
José Manuel Bravo Caro, Diego Marín, Manuel Emilio Gegúndez and Teodoro Álamo Cantarero

Tool wear classification using texture descriptors based on Local Binary Pattern 292
Oscar Garcia-Olalla, Enrique Alegre, Joaquin Barreiro, Laura Fernandez-Robles and Maria Teresa Garcia-Ordas

Mejora de la Estabilidad en Sistemas Takagi-Sugeno mediante la aplicacion del Teorema de Polya con multiíndices 299
Andrés Querol, Carlos V. Ariño, Manuel A. Hernández-Mejías and Antonio Sala

SISTEMA ROBOTICO DE TIPO EXOESQUELETO PARA REHABILITACION DE LA MANO 306
Samara Enriquez, Yalena Narvaez, Oscar Andres Vivas, Jorge Diez, Francisco J. Badesa, Jose Maria Sabater and Nicolas Garcia Aracil

Estudio de la navegación de un planeador autónomo submarino 313
Edwin Loeff, Juanma Gimenez Martinez and Emilio Garcia Moreno

SOLAR DESALINATION MANAGEMENT TO FULFILL GREENHOUSE WATER DEMAND USING PREDICTIVE CONTROL 322
Lidia Roca, Jorge A. Sanchéz, Francisco Rodríguez and Javier Bonilla

Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración 330
José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega and Francisco R. Rubio

SSS-SLAM: An Object Oriented Matlab Framework for Unverwater SLAM using Side Scan Sonar 338
Daniel Moreno, Antoni Burguera and Gabriel Oliver

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS MULTI-AGENTE EN SISTEMAS EMBEBIDOS CON RECURSOS LIMITADOS PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE COORDINACIÓN Y COOPERACIÓN 346
Ángel Soriano, Leonardo Marín, Ángel Valera and Marina Vallés

OPTIMIZACIÓN DINÁMICA MEDIANTE DIFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA USANDO ECOSIMPRO Y CASADI 354
Rubén Martí, Tania Rodriguez, José Luis Pitarch, Daniel Sarabia and César de Prada

INTEGRACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DE ASISTENCIA AL CIRUJANO EN OPERACIONES LAPAROSCÓPICAS DE PUERTO ÚNICO 362
Maria Cuevas-Rodriguez, Belen Estebanez, Enrique Bauzano, Irene Rivas-Blanco, Isabel Garcia-Morales, Victor F. Muñoz, Luis D. Lledo and Jose M. Sabater

Respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto usando herramientas interactivas 370
Maria Langoyo Menasanch and Ramon Costa Castelló

Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano 378
Jorge Antonio Díez Pomares, Francisco J. Badesa, Ricardo Morales, Jose Maria Sabater Navarro, Nicolas Garcia Aracil and Luis Daniel Lledó

Algoritmo de Navegación Autónoma basado en una Arquitectura Distribuida 384
Ángel Soriano, Marina Vallés, Ángel Valera and Pedro Albertos

MODOS ASUMIDOS Y ELEMENTOS FINITOS: COMPARATIVA DE MODELOS PARA ROBOTS FLEXIBLES 392
Pablo Bengoa, Asier Zubizarreta, Aitziber Mancisidor, Itziar Cabanes and Eva Portillo

DISENO Y CONSTRUCCION DE UNA PLATAFORMA AEREA PARA LA CAPTACION DE INFORMACION TOPOGRAFICA 400
Juan Antonio Rodriguez-Haro, Jose Carlos Moreno, Jose Luis Guzman, Fernando Aguilar and Yolanda CantÓn

CONTROL OF OSCILLATING WATER COLUMN (OWC) WAVE ENERGY PLANTS 409
Aitor J. Garrido, Mikel Alberdi, Izaskun Garrido and Modesto Amundarain

MODELADO MULTIBODY Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO 416
Sara Mata, Asier Zubizarreta, Charles Pinto, Javier Corral and Itziar Cabanes

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO NEUMATICO PARA REHABILITACION DE MANO MEDIANTE FUNDA TERMORETRACTIL 424
Yalena Narváez, Oscar Andrés Vivas, Samara Catalina Enriquez, Jose Maria Sabater-Navarro, Nicolas Garcia and Alvaro Martínez

Reconstrucción 3D de racimos de uva basada en estéreo-visión 430
Carlos Alberto Molina Toscano, Antonio José Sánchez Salmerón and Eugenio Ivorra Martínez

CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO 436
Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez and Alfonso García-Cerezo

CRITERIOS PARA RESOLUCIÓN DE REDUNDANCIA EN CONTROL VISUAL DIRECTO DE MANIPULADORES 442
Javier Perez, Jorge Pomares, Gabriel J. Garcia, Carlos A. Jara and Fernando Torres

EQUIPO PARA PRÁCTICAS DE FUNDAMENTOS DE AUTOMÁTICA 450
Alfonso V. Poncela Méndez, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz

Diseño de un regulador Fuzzy para planta de laboratorio 458
José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle and Matilde Santos

CONTROL DE RELOJ DE TORRE CON ARDUINO 464
F. Javier García Ruíz, Eduardo J. Moya de La Torre and Alfonso V. Poncela Méndez

Reconfiguración de sistemas de control basado en multiagentes 472
Rafael Priego, Unai Gangoiti, Darío Orive and Marga Marcos

Control de balanceo de carga de un grupo de servidores de red 478
Miquel Talavera-Foix and Carolina Albea

IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE CONTROL BILATERAL DE 1 GDL CON ARDUINO PARA TELERROBÓTICA 484
Adrián Peidró Vidal, Juan José Rodríguez Gil, José María Azorín Poveda and Oscar Reinoso García

ARQUITECTURA ABIERTA DE CONTROL VISUAL DIRECTO SOBRE FPGA 492
Aiman Alabdo, Gabriel J. Garcia, Jorge Pomares and Fernando Torres

PROTOTIPO DE ROBOT DE SERVICIO PARA GUIADO DE PERSONAS POR VISIÓN. 500
Abel Martínez, Houcine Hassan, Carlos Domínguez and Pedro López

A segmentation approach for evaluating wear of inserts in milling machines with computer vision techniques 507
Guillermo Martínez-San-Martín, Laura Fernández-Robles, Enrique Alegre and Oscar García-Olalla

Optimización de la producción de biomasa en fotobiorreactores tubulares 513
Gustavo Andrade, Daniel Pagano, José Luis Guzmán and Manuel Berenguel

Avances recientes en manipulación subacuática en el subproyecto GRASPER 520
Antonio Peñalver, Jose J. Fernández, Javier Pérez, Jorge Sales, Juan C. García, David Fornas, Raul Marín and Pedro J. Sanz

Printbots: un gran paso hacia adelante 528
Leopoldo Armesto, Andrés Conejero, Miguel Fernández, Pedro Fuentes, David Perry, Enrique Martínez, Vicente Marhuenda, Carles Igual, Carlos De La Fuente and Oihan Elesgaray

TRANSFERENCIA DE COMPORTAMIENTOS DE NAVEGACION HUMANA A UN PLANIFICADOR LOCAL DE ROBOTS 536
Rafael Ramón-Vigo, Noé Pérez-Higueras, Luis Merino and Fernando Caballero

DESARROLLO METODOLÓGICO DE SISTEMAS DE CONTROL APLICANDO INGENIERÍA CONDUCIDA POR MODELOS 544
Maria Luz Alvarez, Arantzazu Burgos, Maria Isabel Sarachaga, Elisabet Estévez and Marga Marcos

Plataforma para la implementación y validación de algoritmos de control de tiempo real en mini-helicópteros de varios rotores 552
Luis Ródenas, Ricardo Sanz, Pablo Albiol, Alberto Castillo, Daniel Verdú and Pedro García

PLATAFORMA PARA LA FORMACIÓN PRÁCTICA INDIVIDUALIZADA EN FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO 560
Carlos Sánchez Cazorla, David Muñoz de La Peña and Fabio Gómez-Estern

Primeros resultados de un control genético predictivo sobre maqueta de helicóptero (twinrotor) 568
Asier Gutierrez, Eloy Irigoyen, Ekaitz Larzabal, Juan José Valera and Mikel Larrea

MODELADO DE MOTORES USM PARA ROBOTICA DE REHABILITACION 575
Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Fernando Martin Monar and Dolores Blanco

SEMANTIC ENVIRONMENT FORMALIZATION FOR MOBILE ROBOTS NAVIGATION 581
Eduardo Munera Sánchez, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose-Luis Poza-Luján, Jose E. Simó Ten and J. Francisco Blanes Noguera

Seguimiento de caminos para formaciones de vehículos marinos de superficie 588
Jesus M. de La Cruz Garcia, José A. López-Orozco, Eva Besada-Portas, David Moreno Salinas and Joaquin Aranda Almansa

SIMULACION DE LA MANO HUMANA MEDIANTE MATLAB/SIMMECHANICS 596
Dorin Sabin Copaci, Juan Carlos Garcia Pozo, Antonio Flores Caballero and Dolores Blanco

Mejora de la localizaciónn de un cuadricóptero mediante la fusión de su sistema de metrología y un GPS 602
José Luis Racero Robles, Santiago Sastre, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto and Jesús Picó

Optimización en dos etapas para la gestión energética en edificios 610
Jorn K. Gruber, Francisco Huerta, Pablo Matatagui and Milan Prodanovic

SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE CREACIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN VISUAL DE UN ROBOT MÓVIL 617
Luis Paya, Francisco Amoros, Arturo Gil, Lorenzo Fernandez and Oscar Reinoso

CPWalker - Plataforma robótica para la rehabilitación y el entrenamiento de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral 625
Rafael Raya, Óscar Ramírez, María Dolores Del Castillo, José Ignacio Serrano, Angel Iglesias, Ramón Ceres, Eduardo Rocon, Fernando Mollá, Juan Manuel Belda, Rakel Poveda, Amparo López, Ignacio Martínez, Sergio Lerma and Teresa Martín

Control Supervisor para el Control De Sistemas de Fabricación Reconfigurables 629
Francisco Javier Lastra Santos, Jesús Ángel Trujillo Medina, Elías Revestido Herrero, José Ramón Llata García and Francisco Jesús Velasco González

Navegación local de un robot móvil con costes sociales aprendidos por demostración 636
Noé Pérez-Higueras, Rafael Ramón-Vigo, Fernando Caballero and Luis Merino

CONTROLADOR RESETEADO DE DESLIZAMIENTO DE RUEDAS PARA SISTEMAS DE FRENADO 644
Emma Delgado, Antonio Barreiro, Miguel Díaz-Cacho and Pablo Falcón

GENERACIÓN Y REPRODUCCIÓN DE SOMBRAS EN TIEMPO REAL EN EASY JAVA SIMULATIONS 652
Francisco J. García, Carlos A. Jara, Francisco A. Candelas, Fernando Torres and Francisco Esquembre

Planificación de rutas para la cobertura de un área en tiempo mínimo mediante un sistema Multi-UAV 659
Ernesto Santana, Romualdo Moreno and Miquel Piera

Diseño de control no lineal para regulación de tasa de crecimiento en cultivos multisustrato 666
Sebastián Nuñez, Fabricio Garelli, Hernán De Battista and Jesús Picó

Localización de objetos 3D con ambigüedad de vista en tareas de guiado robótico 673
Carlos M. Mateo, Pablo Gil and Fernando Torres

INTEGRACIÓN DE RECONOCIMIENTO DE ESCENAS Y LOCALIZACIÓN BASADA EN MONTE CARLO 680
Javier Perez, Fernando Caballero and Luis Merino

DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DISTRIBUIDO EN ROBOTS MÓVILES SOBRE EL MIDDLEWARE DEL NÚCLEO DE CONTROL 688
Josep Tormo, Raúl Simarro Fernández, Eduardo Munera, José E. Simó Ten and Juan-Luis Posadas-Yagüe

ENFOQUE UNIFICADO DEL DISEÑO DE PID MEDIANTE EL LUGAR DE LAS RAÍCES Y EN FRECUENCIA 695
Roberto Sanchis Llopis, Ignacio Peñarrocha Alós and Julio Ariel Romero Pérez

HERRAMIENTA DE SIMULACION PARA EL DESARROLLO DE EXOESQUELETOS BASADA EN MATLAB-SIMULINK 702
Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco and Luis Moreno

Reconstrucción cinemática del brazo humano mediante matrices de transformación 707
José María Catalán Orts, Ricardo Morales Vidal, Luis Daniel Lledó, José María Sabater Navarro, Nicolás García Aracil and Jorge Antonio Díez

Diseño e implementación de una plataforma experimental para el control de vuelo, gestión y visualización de datos de UAVs 714
Santiago Sastre, José Luis Racero Robles, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto and Jesús Picó

Configuración y ejecución de benchmarks de intervención robótica submarina en UWSim mediante herramientas Web 722
Javier Pérez Soler, Jorge Sales, Raul Marín, Enric Cervera and Pedro J. Sanz

SISTEMA DE CONTROL DE HELICÓPTEROS MEDIANTE FIJACIÓN POR CABLE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE LAS VARIACIONES DE LA GUIÑADA EN VUELO ESTACIONARIO 730
Álvaro Caballero, Manuel Béjar and Aníbal Ollero

AJUSTE DE CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS POR CUANTIFICACIÓN Y CRUCE DE NIVELES 738
Julio Ariel Romero, Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha

Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Entorno para Usuarios con Parálisis Cerebral 746
Miguel Velasco, Alejandro Clemotte, Rafael Raya and Ramón Ceres

ESTIMACIÓN DE PARAMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO 753
Elías Revestido Herrero, Francisco Javier Lastra Santos, Francisco J. Velasco González, José María Riola Rodríguez, Juan Jesús Díaz Hernández and Luis Manuel Vega Antolín

Desarrollo de un sensor subacuático ultrasónico y RF para posicionamiento en tareas de manipulación robótica 761
Diego Centelles, Jorge Sales, Raul Marín, Jose Vte. Martí, David Fornas and Pedro J Sanz

SLAM VISUAL HÍBRIDO TOPOLÓGICO-MÉTRICO MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL 771
Lorenzo Fernandez, Luis Paya, Arturo Gil, Adrian Peidro and Oscar Reinoso

NORMA IEC-61499 PARA EL CONTROL DISTRIBUIDO. APLICACIÓN AL CNC. 778
Esteban Querol, Julio A. Romero, Antonio M. Estruch and Fernando Romero

MPC tuning in a hierarchical control structure for a wastewater treatment process 786
Ignacio Santin, Carles Pedret and Ramon Vilanova

CONTROL JERÁRQUICO DE PLANTA COMPLETA DE UN CASO DE ESTUDIO DE CRISTALIZACIÓN DE AZÚCAR 794
Rogelio Mazaeda, Smaranda Cristea and César de Prada

Analysis of controller performance in wastewater treatment 801
Jean Carlos Malca and Ramon Vilanova

Entorno de desarrollo integrado para robots mini-humanoides basado en modelado por componentes 809
Félix R. Cañadillas, Marcos Arjonilla Viñaras and Alberto Jardón Huete

Métodos bio-inspirados en el control PID de un motor 815
Jacobo Sáenz Valiente and Matilde Santos Peñas

Diseño de una plataforma híbrida aéreo-terrestre para aplicaciones de inspección visual 822
Joan Pep Company and Alberto Ortiz

Algoritmo para particionado automático de sistemas con criticidad mixta 830
Emilio Salazar, Alejandro Alonso and Salvador Trujillo

ENFOQUE ESTRATÉGICO PARA EL PROBLEMA PEG-IN-HOLE UTILIZANDO PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS 840
Fares Abu-Dakka and Mohamed Abderrahim

Gliif: Beyond QR Codes 847
Oscar Deniz Suarez, Jose M. Gutierrez, Jesus Salido, Gloria Bueno and Alan Bologlu

VERIFICACION Y VALIDACION DE SISTEMAS DE CONTROL DE VUELO PARA MAV-VTOL BASADAS EN MATLAB STATEFLOW 854
Pablo Rodriguez Diaz, Jesús G. Villagómez, Manuel Vargas Villanueva and Francisco R. Rubio

SENSORY PROCESSING OPTIMIZATION IN A SMART DEVICE 862
Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera Sanchez, Juan-Luis Posadas-YagÜe and Raul Simarro

CABEZA MECATRÓNICA CON INTELIGENCIA EMOCIONAL Y ARTIFICIAL 868
Sheila Lucero Sánchez López, Eduardo Zalama Casanova and Jaime Gómez García-Bermejo

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PARA LA DINÁMICA SINÁPTICA DE UN SISTEMA NEURONAL BASADOS EN REDES DE PETRI Y MÁQUINAS DE ESTADOS 875
Martin Bogdan, Karim El-Laithy, Juan Ignacio Latorre and Emilio Jimenez

ESTIMACIÓN MONOCULAR Y EFICIENTE DE LA POSE USANDO MODELOS 3D COMPLEJOS 883
Antonio Rubio Romano, Michael Villamizar, Luis Ferraz Colomina, Alberto Sanfeliu Cortés, Francesc Moreno Noguer and Adrián Peñate-Sánchez

Alternativas de biología sintética para el control de rutas metabólicas 891
Pavel Zach, Alejandro Vignoni, Daniel Georgiev and Jesús Picó

Uso de Simulink y Arduino para Prácticas de Robótica 899
Juan Gil Lozano, Antonio Muñoz Ramírez, Víctor Eugenio Torres López and Jesus Gomez

CONFIGURATION MODEL FOR CONTROL KERNEL MIDDLEWARE BASED APPLICATIONS 909
Jose L. Beltran, Lorena Calabuig, Eduardo Munera, Jose Simo and Jose-Luis Poza-Luján

NAVEGACIÓN REACTIVA EN ENTORNOS ESTRECHOS E INTRINCADOS 916
Javier Antich Tobaruela and Alberto Ortiz Rodríguez

Control de Movimientos mediante Bus EtherCAT y LinuxCNC 926
Ignacio Rosales González, Víctor Eugenio Torres López and Jesus Gomez

Survey on Progressive Image Compression and Transmission and its application in Underwater Intervention Missions 935
Eduardo Moscoso, Raul Marín, Jorge Sales and Pedro J. Sanz

MARCO PARA EL ANÁLISIS DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN 3D OBTENIDA CON ESCÁNERES LÁSER 941
Pilar Merchán, Santiago Salamanca, Antonio Adán and María José Gómez

Implementación de controladores PID y su Optimalidad en el espacio de objetivos 949
Helem Sanchez and Ramon Vilanova

MÉTODO DE LOCALIZACIÓN PRECISA DE PUPILAS EN IMÁGENES A COLOR 955
J. Enrique Sierra and Matilde Santos

Octree-Based Subsampling Criteria for Bathymetric SLAM 962
Albert Palomer, Pere Ridao Rodriguez, David Ribas Romagos and Guillem Vallicrosa

OPERACION OPTIMA DE LA PLANTA DE LOS 4 TANQUES 968
Mauricio Alva Howes, Alejandro García Delgado, Néstor García Hidalgo and Ramon Costa Castelló

Nonlinear Predictive Control for the Four-Tanks Plant Flow Regulation 974
Juan Acevedo, Julio Luna and Noè Rosanas

Estudio de escenarios de uso para un robot social asistencial para enfermos de Alzheimer 980
Miguel A. Salichs, Esther Salichs, Irene P. Encinar, Álvaro Castro-González and María Malfaz

Extrusor Multifilamento para Impresión 3D en Color 988
Víctor Andueza García and Jesús Manuel Gómez de Gabriel

Concurso en Ingeniería de Control 2014. Operación Óptima de la planta de 4 tanques. Control multivariable. 996
Alberto Pajares Ferrando and Francesc Xavier Blasco Ferragud

CONTROL PREDICTIVO PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS POR LOTES EN LA INDUSTRÍA AZUCARERA 1002
Alexander Rodriguez, Luis Felipe Acebes, Cesar De Prada and Rogelio Mazaeda

DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS MÓVILES UTILIZANDO UN ESCÁNER LÁSER MEDIANTE FILTROS DE KALMAN 1009
Marc Bosch Jorge, Angel Soriano, Ángel Valera and Antonio J. Sánchez Salmerón

Control of a Quadruple Tank Process using a Mixed Economic and Standard MPC 1016
Adrià Soldevila, Julen Cayero, Jean Carlo Salazar, Damiano Rotondo and Vicenç Puig

PROPUESTA DE ONTOLOGÍA PARA EL CONTROL DE ENTORNOS EXTERIORES 1022
Miguel Juan-Monter, Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera and Raúl Simarro Fernández

Índice de Autores

Abderrahim, Mohamed 840
Abril, Juan F. 42
Abu-Dakka, Fares 840
Acebes, Luis Felipe 1002
Acevedo, Juan 974
Acién, Francisco Gabriel 3
Adán, Antonio 941
Aguilar, Fernando 400
Alabdo, Aiman 492
Albea, Carolina 478
Alberdi, Mikel 409
Albertos, Pedro 114, 384
Albiol, Pablo 552
Alcázar, Joaquín 94
Alegre, Enrique 272, 279, 292, 507
Alfaya, José A. 330
Alfonso Gil, José Carlos 122
Alkorta, Patxi 88
Alonso, Alejandro 830
Alonso, C. 82
Alonso, Rubén 179
Alva Howes, Mauricio 968
Alvarez, Maria Luz 544
Amoros, Francisco 617
Amorós, Francisco 106
Amundarain, Modesto 409
Andrade, Gustavo 513
Andueza García, Víctor 988
Andújar Márquez, José Manuel 70
Antich Tobaruela, Javier 916
Aranda Almansa, Joaquin 588
Ariño, Carlos 122, 144
Ariño, Carlos V. 299
Arjonilla Viñaras, Marcos 809
Armesto, Leopoldo 528
Artaso, Pablo 243
Azorin, Jose M. 94, 100, 166, 236
Azorín Poveda, José María 484
Azorín, José M. 42

Badesa, Francisco J. 306, 378
Baeyens, Enrqiue 222
Balaguer, Carlos 19
Barambones, Oscar 49, 88
Barragán Piña, Antonio Javier 70
Barreiro, Antonio 644
Barreiro, Joaquin 279, 292
Barrientos, Antonio 265
Bauzano, Enrique 362

Bejarano, Guillermo 330
Belda, Juan Manuel 625
Beltran, Jose L. 909
Beltrán, Hector 122
Bengoa, Pablo 392
Berenguel, Manuel 150, 513
Bernad Viciano, Carlos 122
Berná Galiano, José Ángel 198, 207
Besada-Portas, Eva 588
Blanco, Dolores 575, 596, 702
Blanes Noguera, J. Francisco 581
Blasco Ferragud, Francesc Xavier 996
Boada, Yadira 158
Bogdan, Martin 875
Bologlu, Alan 847
Bonilla, Javier 322
Bosch Jorge, Marc 1009
Bravo Caro, José Manuel 286
Bueno, Gloria 847
Burgos, Arantzazu 544
Burguera, Antoni 338
Béjar, Manuel 730

Caballero, Fernando 536, 636, 680
Caballero, Álvaro 730
Cabanes, Itziar 392, 416
Calabuig, Lorena 909
Calvo-Rolle, José Luis 458
Cancar, Leandro 265
Candelas, Francisco A. 652
Cano, José M. 236
CantÓn, Yolanda 400
Casteleiro-Roca, José Luis 458
Castilla, María Del Mar 150
Castillo, Alberto 552
Castillo-Rivera, Salvador 34
Castro-González, Álvaro 980
Catalán Orts, José María 707
Cayero, Julen 1016
Centelles, Diego 761
Ceres, Ramón 625, 746
Cervera, Enric 722
Clemotte, Alejandro 746
Climent, José M. 236
Company, Joan Pep 822
Conejero, Andrés 528
Copaci, Dorin Sabin 575, 596, 702
Corral, Javier 416
Cortajarena, Jose A. 88
Costa Castelló, Ramon 215, 370, 968
Costa, Álvaro 42, 94
Cristea, Smaranda 794
Cuenca, Angel 114
Cuevas Rodriguez, María 228
Cuevas-Rodriguez, Maria 362

De Battista, Hernán 666
de La Cruz Garcia, Jesus M. 588
De La Fuente, Carlos 528
De Marcos, Julián 88
De Prada, Cesar 1002

de Prada, César 354, 794
Del Castillo, María Dolores 625
Del Cerro, Jaime 265
Del-Ama Espinosa, Antonio J. 136
Delgado, Emma 644
Deniz Suarez, Oscar 847
Diaz, Pablo Rodriguez 854
Diez, Jorge 306
Domínguez, Carlos 500
Díaz Hernández, Juan Jesús 753
Díaz-Cacho, Miguel 644
Díez Pomares, Jorge Antonio 378
Díez, Jorge Antonio 707

El-Laithy, Karim 875
Elesgaray, Oihan 528
Enriquez, Samara 306
Enriquez, Samara Catalina 424
Espín, Montserrat 251
Esquembre, Francisco 652
Estebanez, Belen 362
Estebanez, Belén 228
Estruch, Antonio M. 778
Estévez, Elisabet 544

Falcón, Pablo 644
Farhat, Maissa 49
Felip León, Javier 64
Fernandez, Lorenzo 617, 771
Fernandez-Lozano, Jesus 258
Fernandez-Robles, Laura 292
Fernández, Ignacio 3
Fernández, Jose J. 520
Fernández, Miguel 528
Fernández-Robles, Laura 507
Ferraz Colomina, Luis 883
Flores Caballero, Antonio 575, 596, 702
Flores, Jose A. 166
Fornas, David 520, 761
Fragoso, Sergio 56, 75
Fraile, Juan C. 179
Fraile, Juan Carlos 222
Fuente, David De La 179
Fuentes, Pedro 528

Gangoiti, Unai 472
Garcia Aracil, Nicolas 306, 378
Garcia Moreno, Emilio 313
Garcia Pozo, Juan Carlos 596
Garcia, Diego 272
Garcia, Gabriel J. 442, 492
Garcia, Nicolas 424
Garcia-Morales, Isabel 362
Garcia-Olalla, Oscar 292
Garcia-Ordas, Diego 279
Garcia-Ordas, Maria Teresa 279, 292
García Aracil, Nicolás 707
García Delgado, Alejandro 968
García Hidalgo, Néstor 968
García Morales, Isabel 228
García Ruíz, F. Javier 450, 464
García Sánchez, Juan Carlos 64

García, Francisco J. 652
García, Juan C. 520
García, Pedro 114, 552
García-Cerezo, Alfonso 258, 436
García-Nieto, Sergio 602, 714
García-Olalla, Oscar 507
Garelli, Fabricio 666
Garrido, Aitor J. 409
Garrido, Izaskun 409
Garrido, Juan 56
Gayubo, Fernanado 222
Gayubo, Fernando 179
Gegúndez, Manuel Emilio 286
Georgiev, Daniel 891
Gil Agudo, Ángel 136
Gil Chica, Francisco Javier 191, 198, 207
Gil Lozano, Juan 899
Gil, Arturo 11, 617, 771
Gil, Pablo 673
Gil-Chica, Francisco Javier 186
Gimenez Martinez, Juanma 313
Gimeno, Javier 166
Gomez, Jesus 899, 926
Gonzalez de Durana, Jose M. 49
Gonzalez, Victor 272
Gonzalez-Castro, Victor 279
González Pérez, Verónica 19
González, Alejandra 158
González, José Luis 179
Gruber, Jorn K. 610
Gutierrez, Asier 568
Gutierrez, Jose M. 847
Guzman, Jose Luis 400
Guzmán, José Luis 3, 513
Gómez de Gabriel, Jesús Manuel 988
Gómez García-Bermejo, Jaime 868
Gómez, María José 941
Gómez-Estern, Fabio 560

Hassan, Houcine 500
Hernandez Mejias, Manuel Alejandro 144
Hernández-Mejías, Manuel A. 299
Herreros, Alberto 222
Hortal, Enrique 166, 236
Huerta, Francisco 610
Husar, Attila 215

Iglesias, Angel 625
Igual, Carles 528
Irigoyen, Eloy 568
Ivorra Martínez, Eugenio 430
Iáñez, Eduardo 42, 94, 100

Jara, Carlos A. 442, 652
Jardón Huete, Alberto 809
Jimenez, Emilio 875
Jimenez-Garcia, Jose-Luis 862, 1022
Jiménez, Luis Miguel 106
Jose Luis, Fernandez Marron 130
Jose Miguel, Barcala Riveira 130
Juan, Blazquez Martinez 130
Juan-Monter, Miguel 1022

Langoyo Menasanch, Maria 370
Larrea, Mikel 568
Larzabal, Ekaitz 568
Lastra Santos, Francisco Javier 629, 753
Latorre, Juan Ignacio 875
Lerma, Sergio 625
León, Alberto 236
Llata García, José Ramón 629
Lledo, Luis D. 362
Lledó, Luis Daniel 378, 707
Loeff, Edwin 313
Luna, Julio 974
López Fernández, Joaquín 172
López, Amable 251
López, Amparo 625
López, Belén 100
López, Pedro 500
López-Nicolás, Gonzalo 243
López-Orozco, José A. 588

Malca, Jean Carlos 801
Malfaz, María 980
Mancisidor, Aitziber 392
Mandow, Anthony 436
Marcos, Marga 472, 544
Marhuenda, Vicente 528
Marichal Plasencia, G. Nicolas 34
Marichal, G. N. 82
Martin Monar, Fernando 575
Martí, Jose Vte. 761
Martí, Rubén 354
Martín, Teresa 625
Martín-Guzmán, Miguel 258
Martín-Ávila, Juan 258
Martínez Bohórquez, Miguel Ángel 70
Martínez, Abel 500
Martínez, Alvaro 424
Martínez, Enrique 528
Martínez, Ignacio 625
Martínez, Jorge L. 436
Martínez-San-Martín, Guillermo 507
Marín, Diego 286
Marín, José María 11
Marín, Leonardo 346
Marín, Raul 520, 722, 761, 935
Mata, Sara 416
Matatagui, Pablo 610
Mateo, Carlos M. 673
Mato, Miguel 222
Mazaeda, Rogelio 794, 1002
Melón, E. 82
Merchán, Pilar 941
Merino, Luis 536, 636, 680
Molina Toscano, Carlos Alberto 430
Mollá, Fernando 625
Monje Micharet, Concepción Alicia 19
Morales Vidal, Ricardo 707
Morales, Jesús 436
Morales, Ricardo 378
Moreno Noguer, Francesc 883
Moreno Salinas, David 588

Moreno, Daniel 338
Moreno, Jose Carlos 400
Moreno, Luis 702
Moreno, Romualdo 659
Morilla, Fernando 56
Moscoso, Eduardo 935
Moya de La Torre, Eduardo J. 450, 464
Munera Sanchez, Eduardo 862
Munera Sánchez, Eduardo 581
Munera, Eduardo 688, 909, 1022
Muñoz de La Peña, David 560
Muñoz Ramírez, Antonio 899
Muñoz, Victor F. 362
Muñoz, Víctor 228

Narvaez, Yalena 306
Narváez, Yalena 424
Normey Rico, Julio Elias 150
Nuñez, Sebastián 666
Núñez, Luis Ramón 251

Oliver, Gabriel 338
Ollero, Aníbal 730
Orive, Darío 472
Ortega, Manuel G. 330
Ortiz Rodríguez, Alberto 916
Ortiz, Alberto 822

P. Encinar, Irene 980
Padrón, I. 82
Pagano, Daniel 513
Pajares Ferrando, Alberto 996
Palomer, Albert 962
Paya, Luis 106, 617, 771
Payá, Luís 11
Pedret, Carles 786
Peidro, Adrian 771
Peidró Vidal, Adrián 484
Peidró, Adrián 11
Perez, Javier 442, 680
Perez-Molina, Manuel 186, 198, 207
Perez-Vidal, Carlos 100
Perry, David 528
Peñalver, Antonio 520
Peñarrocha Alós, Ignacio 695
Peñarrocha, Ignacio 738
Peñate-Sánchez, Adrián 883
Picó, Jesús 158, 602, 666, 714, 891
Piera, Miquel 659
Pinto, Charles 416
Pitarch, José Luis 354
Piñuela Martín, Elisa 136
Planelles, Daniel 42, 100
Pomares, Jorge 442, 492
Poncela Méndez, Alfonso V. 450, 464
Pons, José L. 94
Portillo, Eva 392
Posadas-YagÜe, Juan-Luis 862
Posadas-Yagüe, Juan-Luis 581, 688
Poveda, Rakel 625
Poza-Luján, Jose-Luis 581, 862, 909, 1022
Priego, Rafael 472

Prodanovic, Milan 610
Puig, Vicenç 1016
Pérez Losada, Diego 172
Pérez Soler, Javier 722
Pérez Turiel, Javier 222
Pérez, Emilio 122
Pérez, Javier 520
Pérez-Castro, Agustín 3
Pérez-Higueras, Noé 536, 636
Pérez-Molina, Manuel 191
Pérez-Polo, Manuel 186, 191, 198, 207

Querol, Andrés 144, 299
Querol, Esteban 778

R. Cañadillas, Félix 809
Racero Robles, José Luis 602, 714
Ramos, Jose A 49
Ramírez, Óscar 625
Ramón-Vigo, Rafael 536, 636
Raya, Rafael 625, 746
Reinoso García, Oscar 484
Reinoso, Oscar 106, 617, 771
Reinoso, Óscar 11
Revestido Herrero, Elías 629, 753
Reynoso-Meza, Gilberto 158
Ribas Romagos, David 962
Ridao Rodriguez, Pere 962
Riera Colomer, Jordi 215
Riola Rodríguez, José María 753
Rivas Blanco, Irene 228
Rivas-Blanco, Irene 362
Roca, Lidia 322
Rocon, Eduardo 625
Rodriguez, Alexander 1002
Rodriguez, David 75
Rodriguez, Tania 354
Rodriguez-Haro, Juan Antonio 400
Rodríguez Gil, Juan José 484
Rodríguez, Alberto 236
Rodríguez, Francisco 150, 322
Rodríguez, J. A. 82
Romero Pérez, Julio Ariel 695
Romero, Fernando 778
Romero, Julio A. 778
Romero, Julio Ariel 738
Rosales González, Ignacio 926
Rosanas, Noè 974
Rossi, Claudio 265
Rotondo, Damiano 1016
Rubio Romano, Antonio 883
Rubio, Francisco R. 330, 854
Ruz, Mario L. 75
Ríos, Inmaculada 166
Ródenas, Luis 552

Sabater Navarro, Jose Maria 378
Sabater Navarro, José María 707
Sabater, Jose M. 362
Sabater, Jose Maria 306
Sabater-Navarro, Jose Maria 424
Sala, Antonio 144, 299

Salamanca, Santiago 941
Salazar, Emilio 830
Salazar, Jean Carlo 1016
Sales, Jorge 520, 722, 761, 935
Salichs, Esther 980
Salichs, Miguel A. 980
Salido, Jesus 847
Sanchez, Adrian 272
Sanchez, Helem 949
Sanchez, José Luis 222
Sanchis Llopis, Roberto 695, 738
Sanchéz, Jorge A. 322
Sanfeliu Cortés, Alberto 883
Santana, Ernesto 659
Santin, Ignacio 786
Santos Fernández, María 172
Santos Peñas, Matilde 815
Santos, Matilde 458, 955
Sanz, David 265
Sanz, Pedro J 64, 761
Sanz, Pedro J. 520, 722, 935
Sanz, Ricardo 552
Sarabia, Daniel 354
Sarachaga, Maria Isabel 544
Sastre, Santiago 602, 714
Segura Manzano, Francisca 70
Serrano, José Ignacio 625
Sierra, J. Enrique 955
Simarro Fernández, Raúl 688, 1022
Simarro, Raul 862
Simo, Jose 909
Simó Ten, Jose E. 581
Simó Ten, José E. 688
Soldevila, Adrià 1016
Somolinos, Jose A 251
Soriano, Angel 1009
Soriano, Ángel 346, 384
Strahl, Stephan 215
Sáenz Valiente, Jacobo 815
Sánchez Cazorla, Carlos 560
Sánchez López, Sheila Lucero 868
Sánchez Salmerón, Antonio J. 1009
Sánchez Salmerón, Antonio José 430
Sánchez, José 3

Talavera-Foix, Miquel 478
Tomas-Rodriguez, Maria 34
Tormo, Josep 688
Torres López, Víctor Eugenio 899, 926
Torres, Fernando 442, 492, 652, 673
Trujillo Medina, Jesús Ángel 629
Trujillo, Salvador 830
Turiel, Javier P. 179

Valbuena, Javier 436
Valente, João 265
Valera, Juan José 568
Valera, Ángel 346, 384, 1009
Valiente, David 106
Vallicrosa, Guillem 962
Vallés, Marina 346, 384
Vargas Riaño, Julio Hernando 26

Vazquez, Francisco 75
Vega Antolín, Luis Manuel 753
Veiga Almagro, Carlos 64
Velasco González, Francisco J. 753
Velasco González, Francisco Jesús 629
Velasco, Miguel 746
Verdú, Daniel 552
Vignoni, Alejandro 158, 602, 714, 891
Vilanova, Ramon 786, 801, 949
Villagómez, Jesús G. 854
Villamizar, Michael 883
Villanueva, Manuel Vargas 854
Vivas, Oscar Andres 306
Vivas, Oscar Andrés 424
VÁzquez, Francisco 56

Zach, Pavel 891
Zalama Casanova, Eduardo 868
Zamora, Miguel 75
Zotovic Stanisic, Ranko 26
Zubizarreta, Asier 392, 416

Álamo Cantarero, Teodoro 286
Álvarez, José Domingo 150
Úbeda, Andrés 94, 100

Contribuciones

PhotoBioLib: una librería de *Modelica* para el modelado y simulación de fotobiorreactores

A. Pérez-Castro[a], J. Sánchez[a], F. G. Acién[b], I. Fernández[c], J. L. Guzmán[c]
[a]Dpto. de Informática y Automática (UNED), [b]Dpto. de Ingeniería (UAL), [c]Dpto. de Informática (UAL)
agustinperezcastro@bec.uned.es, jsanchez@dia.uned.es, facien@ual.es, joguzman@ual.es, ifernandez@ual.es

Resumen

Este artículo presenta la librería PhotoBioLib. *Dicha librería, implementada en* Modelica*, permite el modelado y simulación de fotobiorreactores construyéndolos como si de sistemas reales se trataran, sin necesidad de conocimientos de programación ni de las dinámicas involucradas. Así, se obtienen como resultado modelos con gran parecido con la realidad, con gran potencial de configuración, con la posibilidad de interconexión con otras librerías y con grandes velocidades de simulación.*

Palabras clave: Fotobiorreactores, Modelado, Simulación, Modelica, PhotoBioLib

1. INTRODUCCIÓN

Pese al creciente interés en fotobiorreactores, no existen ni métodos ni software específico para su modelado [8]. La complejidad de modelado e identificación de parámetros, las dificultades en la sensorización de sistemas biológicos y la variedad de configuraciones de fotobiorreactores son, en parte, los causantes de que no existan herramientas específicas para el modelado y simulación de estos sistemas, y que tampoco, dentro de los entornos de modelado y simulación genéricos, existan librerías que hagan referencia específica a los fotobiorreactores.

Es por lo anterior que se ha diseñado la librería *PhotoBioLib* haciendo uso del lenguaje *Modelica*.

En la presente sección se hace referencia al estado del arte en el modelado y simulación de fotobiorreactores, y se enumeran las principales características del lenguaje de modelado *Modelica* y del entorno *Dymola*. En la Sección 2 se exponen brevemente los fenómenos modelados y las ecuaciones que los describen. Más adelante, en la Sección 3, se habla del diseño de la librería desde la perspectiva de los dominios considerados, su esquema de composición y su arquitectura de paquetes. Los resultados obtenidos con el uso de la librería son presentados en la Sección 4. Por último, las virtudes de la librería junto a las posibles mejoras a implementar se enumeran en la Sección 5.

1.1. ESTADO DEL ARTE DEL MODELADO Y SIMULACIÓN DE FOTOBIORREACTORES

En la bibliografía referida a fotobiorreactores, solo se pueden encontrar aplicaciones desarrolladas desde cero, sin el apoyo de librerías especificas; o el uso de programas de modelado y simulación, más o menos genéricos, para modelar y simular algunos aspectos parciales, como pueden ser dinámicas de fluidos o transferencias de calor. Se enumeran a continuación, algunas de las aplicaciones utilizadas en la bibliografía, explicando brevemente en qué tipo de trabajos se utilizan y con qué objetivo específico.

Aspen Plus se usa en [3], donde se hace un estudio de la viabilidad económica de un fotobiorreactor abierto y otro cerrado. En este artículo se utiliza *Aspen Plus* para modelar un balance de masa y energía.

En [10], donde se presenta un fotobiorreactor vertical diseñado para la producción de oxígeno a escala de laboratorio, se utiliza *COMSOL Multiphysics* para examinar las propiedades de transferencia de calor.

Haciendo uso de *Labview*, en [7], con el objetivo de evaluar el potencial de generación de biomasa y la captura de CO_2, teniendo en cuenta distintos tipos de especies de algas, tipos de fotobiorreactores, y localizaciones de instalación, se desarrolla la herramienta *EvAlgae*.

En [12] se utiliza *ANSYS Fluent* para realizar una simulación numérica del rendimiento de la agitación, el historial de la intensidad de luz recibida por las algas y los patrones de fluido dentro de distintos tipos de diseños de fotobiorreactores.

Usando las herramientas *Matlab* y *Simulink* como un simple entorno de programación, modelado y simulación, en [4] se implementa, simula, calibra y valida un modelo dinámico para el cultivo de microalgas, el cual tiene en cuenta la transferencia de materia y energía, y fenómenos biológicos.

MeteoNorm es utilizada para generar los datos meteorológicos necesarios para en [5] realizar simulaciones y desarrollar un modelo de tempera-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tura de un fotobiorreactor plano cerrado que permita investigar los parámetros relevantes que influyen en el comportamiento térmico del mismo.

En [6] se utiliza *SuperPro Designer* para modelar un proceso de captura de CO_2, considerando el crecimiento y la separación de la biomasa, además de la separación del aceite. Todo lo anterior con el objetivo de desarrollar una tecnología sostenible a escala piloto para la captura, a través de microalgas, de los gases de combustión de una central eléctrica para la producción de biodiesel.

El software *Tracepro* se utiliza para diseñar una placa de luz óptima donde, basándose en una patente de colectores solares, se utilizan cables de fibra óptica para distribuir la luz a través del fotobioreactor [11].

También se pueden encontrar en la bibliografía artículos donde se usan combinaciones de las herramientas anteriores. Por ejemplo, en [1] se hace uso de *COMSOL Multiphysics* y de *Aspen Plus* para estudiar la dinámica de fluidos y el consumo de CO_2 dentro de un fotobioreactor helicoidal.

1.2. MODELICA

Modelica es un lenguaje de modelado orientado a objetos que facilita el modelado y simulación de sistemas físicos. *Dymola* es una herramienta que implementa dicho lenguaje, quizás la más importante de las que usan el lenguaje *Modelica*. *Dymola* tiene licencia comercial, pero también se puede hacer uso de herramientas libres y gratuitas como son el caso de *OpenModelica* o *JModelica*.

Las características más importantes de *Modelica* son:

- Descripción acausal de modelos, es decir, basada en ecuaciones. La asignación de causalidad queda en manos del entorno.
- Posibilidad del uso de algoritmos. Estos permiten la descripción de modelos con asignación manual de causalidad así como el uso de funciones.
- Características inherentes a un lenguaje orientado a objetos, como son: abstracción, encapsulamiento, modularidad, principio de ocultación, polimorfismo y herencia múltiple.
- Uso de anotaciones para la descripción gráfica de los distintos elementos así como la posibilidad de documentación en formato html.
- Posibilidad de implementación de modelos híbridos, es decir, con parte continua y partes discretas, así como el uso de eventos, ya sean de tiempo o de estado.

En lo que respecta al entorno de simulación *Dymola*, se pueden destacar las siguientes características:

- Simulación eficiente de modelos. Además de las manipulaciones simbólicas de los modelos estos son traducidos y compilados en C, lo cual permite una mayor eficiencia que otros entornos que usan lenguajes interpretados.
- Mejoras en los algoritmos de manipulación simbólica y de integración sobre otras herramientas.
- Representación de resultados, tanto con la representación en gráficas de datos como con una herramienta de representación de simulaciones tridimensional.

2. HIPÓTESIS DE MODELADO

En esta sección se describen los fenómenos modelados así como las ecuaciones más importantes utilizadas. Para una descripción más completa y mucho más detallada de la hipótesis de modelado se puede consultar en [9].

Las ecuaciones que se utilizan en la librería están inspiradas en las que se presentan en [2] y [4]. El modelado está basado en balances de materia y energía, fenómenos biológicos y en ciertas condiciones de equilibrio que se han de cumplir.

El primer fenómeno a considerar es la tasa fotosintética, la cual marcará la generación y consumo de materia por las microalgas. Ésta vendrá determinada por la radiación media en una sección del fotobiorreactor, ecuación (1), caracterizada a su vez por la radiación solar en la superficie horizontal sin obstáculos, $I_0(t)$; la trayectoria de la luz, d_t; la concentración de biomasa, $C_b(t)$; el coeficiente de extinción de biomasa, K_a; y el factor de distribución, α, que representa la fracción de radiación disponible en un área particular del reactor.

$$I_{av}(t) = \frac{\alpha I_0(t)}{K_a d_t C_b(t)}(1 - exp(K_a d_t C_b(t))) \quad (1)$$

La producción de O_2 y consumo de CO_2 en función de la irradiancia disponible, $P_{O_2}(t)$ y $P_{CO_2}(t)$, están descritas por las ecuaciones (2) y (3), donde: $P_{O_{2,max}}$ es la tasa máxima de fotosíntesis; m, n, K_i y z son parámetros de forma, A_1, A_2, B_1 y B_2 son factores preexponenciales, C_1, C_2, Ea_1 y Ea_2 son energías de activación; la temperatura es representada por $T(t)$; $O_2(t)$ es la concentración de O_2 disuelto; R es la constante universal de los gases ideales; el pH es representado por $pH(t)$; K_{O_2} es la constante de inhibición del oxigeno y r

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

es la tasa de respiración. La producción de biomasa se muestra en la ecuación (4), donde: Y_{bo} es el coeficiente de rendimiento de biomasa y V_l es el volumen de líquido.

$$P_{O_2}(t) = \frac{P_{O_2,max} I_{av}(t)^n}{K_i exp(I_{av}(t)m) + I_{av}(t)^n} \left(A_1 exp\left(\frac{-Ea_1}{R\ T(t)}\right) - A_2 exp\left(\frac{-Ea_2}{R\ T(t)}\right)\right) \left(B_1 exp\left(\frac{-C_1}{pH(t)}\right) - B_2 exp\left(\frac{-C_2}{pH(t)}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{O_2(t)}{K_{O_2}}\right)^z\right) - r P_{O_2,max} \quad (2)$$

$$P_{CO_2}(t) = -P_{O_2}(t) \quad (3)$$

$$P_{Cb}(t) = V_l\ P_{O_2}(t) Y_{bo} \quad (4)$$

El carbono inorgánico total, C_T, es la suma de las distintas especies de carbono inorgánico. Por tanto, considerando las constantes de equilibrio K_w, K_1 y K_2 se puede establecer una relación entre la variación de la concentración de $C_T(t)$ y la concentración de $CO_2(t)$, tal y como se muestra en la ecuación (5).

$$\frac{dC_T(t)}{dt} = \left(1 + \frac{K_1}{H^+(t)} + \frac{K_1 K_2}{H^+(t)^2}\right) \frac{dCO_2(t)}{dt} - CO_2(t) \left(\frac{K_1}{H^+(t)^2} + \frac{2K_1K_2}{H^+(t)^3}\right) \frac{dH^+(t)}{dt} \quad (5)$$

En lo que se refiere a la relación entre la concentración de $CO_2(t)$ y la concentración de $H^+(t)$, se ha de cumplir la restricción de electroneutralidad que conduce a la ecuación (6).

$$\frac{dH^+(t)}{dt} = \frac{\frac{K_1}{H^+(t)} + \frac{2K_1K_2}{H^+(t)^2}}{1 + \frac{K_w}{H^+(t)^2} + \frac{K_1 CO_2(t)}{H^+(t)^2} + 4\frac{2K_1K_2}{H^+(t)^3}} \frac{dCO_2(t)}{dt} \quad (6)$$

En el cultivo se produce una transferencia de materia entre la fase gaseosa y la fase líquida. No obstante, esta transferencia solo se modela para el O_2 y al CO_2, ya que el N_2 no es soluble en agua. Así, en las ecuaciones (7) y (8) se muestran dichas transferencias en función del volumen de líquido, $V_l(t)$; de la concentración en equilibrio de O_2 y CO_2 en la fase gaseosa, $O_2^*(t)$ y $CO_2^*(t)$; y de los coeficientes de transferencia de masa volumetricos para el O_2 y el CO_2, $K_{laO2}(t)$ y $K_{laCO2}(t)$. Estos últimos son calculados en función de las relaciones de volumen y velocidad superficial entre la fase líquida y la gaseosa.

$$fO_{2,gl}(t) = V_l(t) K_{laO_2}(t)(O_2^*(t) - O_2(t)) \quad (7)$$

$$fCO_{2,gl}(t) = V_l(t) K_{laCO_2}(t)(CO_2^*(t) - CO_2(t)) \quad (8)$$

Las concentraciones en equilibrio, ecuaciones (9) y (10), son función de la constante de Henry para el O_2 y el CO_2, H_{O_2} y H_{CO_2}; de la presión en el líquido, P_t; y de las fracciones molares del O_2 y el CO_2, $yO_2(t)$ y $yCO_2(t)$.

$$O_2^*(t) = H_{O_2} P_t\ yO_2(t) \quad (9)$$

$$CO_2^*(t) = H_{CO_2} P_t\ yCO_2(t) \quad (10)$$

Se consideran tres mecanismos para la transferencia de calor: convección, radiación y transferencia de calor por medio de transferencia de materia. Estos se describen por las ecuaciones (11), (12) y (13), donde h es el coeficiente de transmisión, S_{conv} es la superficie de contacto, las temperaturas de los elementos que entran en contacto son $T_1(y)$ y $T_2(t)$, $Q_l(t)$ es el flujo de volumen, C_v es la capacidad calorífica volumétrica, $I_c(t)$ es radiación solar, S_{rad} es la superficie que recibe dicha radiación y aR la absortividad de la radiación solar.

$$fQ_c(t) = hS_{conv}(T_1(t) - T_2(t)) \quad (11)$$

$$fQ_r(t) = \alpha\ I_c(t) S_{rad}\ aR \quad (12)$$

$$fQ_m(t) = Q_l(t) C_v T(t) \quad (13)$$

Además de los fenómenos anteriormente descritos, tanto en la fase gaseosa como en la líquida, se producirán flujos de concentraciones de los distintos elementos como consecuencia de los caudales de gas y líquido.

3. DISEÑO DE LA LIBRERÍA

El diseño de la librería se puede describir desde tres perspectivas: los dominios implementados, el esquema de composición de clases y la arquitectura de paquetes.

3.1. DOMINIOS

Se han considerado cuatro dominios, gas, *Gas*; liquído, *Liq*; calor, *Heat*; y líquido con biomasa, *Bio*. Por tanto, los conectores, las interfaces, las clases básicas y algunas de las partes son descritas en función de estos. Además, unos dominios engloban a otros, lo cual se traduce en relaciones de herencia que hacen que las variables de unos estén presentes en otros. Así, el dominio *Heat* está incluido en el dominio *Liq* y éste está incluido en el dominio *Bio*. Esto queda bien representado en los conectores diseñados, cuyas parejas de variables de potencial y de flujo, varibles *accross* y *through*, se muestran en la Tabla 1.

3.2. ESQUEMA DE COMPOSICIÓN

El esquema de composición de clases, representado en la Figura 1, se divide en cuatro niveles.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 1: Variables de los conectores

Conector	**Variable *across***	**Variable *through***
GasCon	Volumen de gas - V_g $[m^3]$	Caudal de gas - fV_g $[m^3\ s^{-1}]$
	Concentración de O_2 - O_{2g} $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de O_2 - fO_{2g} $[mol\ s^{-1}]$
	Concentración de CO_2 - CO_{2g} $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de CO_2 - fCO_{2g} $[mol\ s^{-1}]$
	Concentración de N_2 - N_{2g} $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de N_2 - fN_{2g} $[mol\ s^{-1}]$
HeatCon	Temperatura - T $[K]$	Flujo de calor - fQ $[J\ s^{-1}]$
LiqCon		
BioCon		
LiqCon	Volumen de líquido - V_l $[m^3]$	Caudal de líquido - fV_l $[m^3\ s^{-1}]$
BioCon		
BioCon	Concentración de biomasa - Cb $[Kg\ m^{-3}]$	Flujo de biomasa - fCb $[Kg\ s^{-1}]$
	Concentración de O_2 - O_2 $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de O_2 - fO_2 $[mol\ s^{-1}]$
	Concentración de CO_2 - CO_2 $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de CO_2 - fCO_2 $[mol\ s^{-1}]$
	Concentración de C_T - C_T $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de C_T - fC_T $[mol\ s^{-1}]$
	Concentración de H^+ - H^+ $[mol\ m^{-3}]$	Flujo de H^+ - fH^+ $[mol\ s^{-1}]$

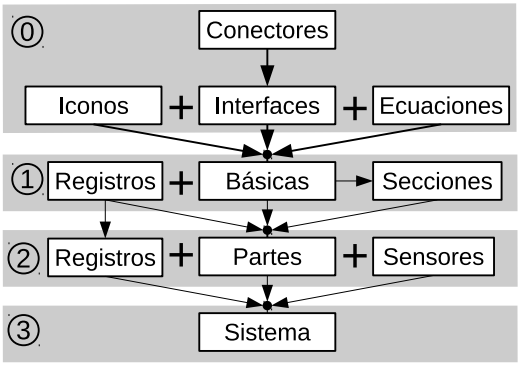
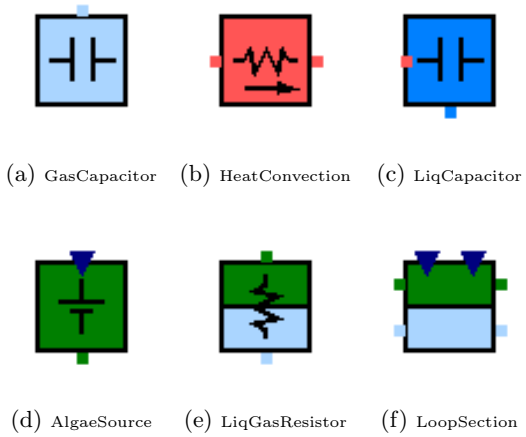


Figura 1: Esquema de composición de clases



(a) GasCapacitor (b) HeatConvection (c) LiqCapacitor

(d) AlgaeSource (e) LiqGasResistor (f) LoopSection

Figura 2: Algunas de las clases *básicas*

En el nivel 0 encontramos los *conectores* y las *interfaces* creadas a través de los mismos; estas interfaces serán las que describan las conexiones con el exterior de cada una de las clases. Además, en este nivel se sitúan también las representaciones gráficas, *iconos*, y las *ecuaciones* que describen la dinámica de cada clase.

A través de la composición de un conjunto de ecuaciones, una interfaz para la transferencia de información y un icono para su descripción gráfica, se crean cada una de las clases *básicas*. Estas clases serán las que marquen los volúmenes de control y los fenómenos de transporte, lo cual queda reflejado en sus iconos, como se puede ver en la Figura 2. Dichas clases básicas se encuentran en el nivel 1 junto a las *secciones*, clases compuestas a partir de clases básicas pero que no tienen entidad por si mismas para considerarse partes; y los *registros*, conjuntos de parámetros y constantes. En la Figura 3 se muestra la composición de una sección.

Para la composición de las *partes* se hará uso de clases básicas, secciones y otras partes, como se muestra en la Figura 4. Además, para la configuración de los parámetros se hará uso de conjuntos de registros, los cuales a su vez pueden estar compuestos por conjuntos de registros del nivel anterior. Todo esto, junto a los *sensores*, formará el nivel 2 del esquema de composición. En la Figura 5 se muestran algunas de las partes implementadas.

Por último, en el nivel 3 del esquema de composición se encuentran las clases que, a partir de la unión de distintas partes, el uso de sensores para la medición de potenciales y flujos, y su configuración con conjuntos de registros, forman sistemas completos equiparables a fotobiorreactores reales. Como ejemplo de sistema completo se ha construido el fotobiorreactor cerrado que se muestra en la Figura 6.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

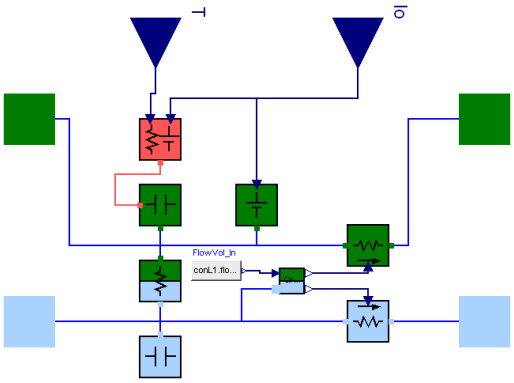


Figura 3: Composición de una sección de lazo

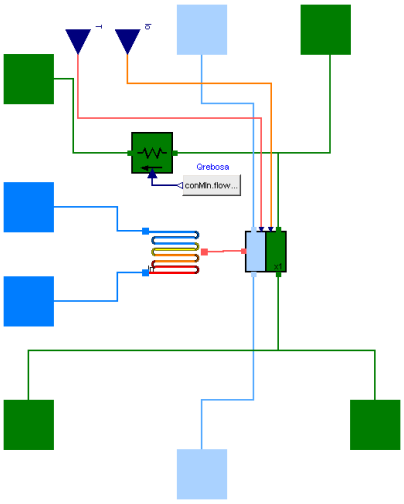
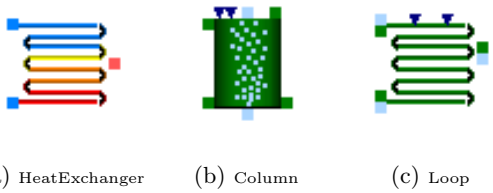


Figura 4: Composición de una columna de burbujeo con intercambiador de calor



(a) HeatExchanger (b) Column (c) Loop

Figura 5: Algunas de las *partes*

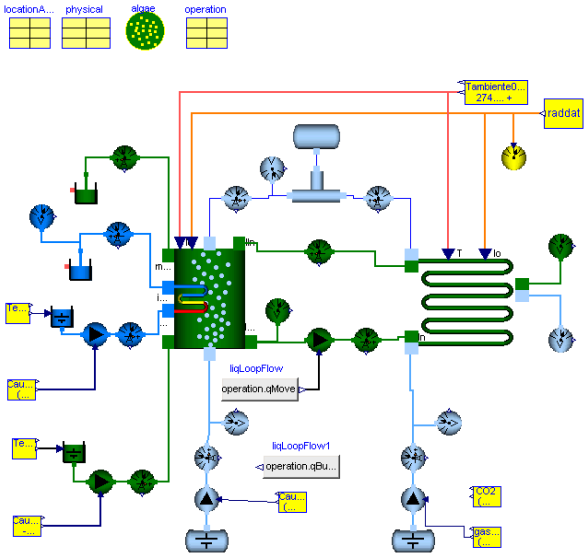


Figura 6: Composición de un fotobiorreactor cerrado completo

3.3. ARQUITECTURA DE LA LIBRERÍA

A continuación se expone, de forma resumida, el contenido de cada uno de los paquetes principales.

- *Basic*: Este paquete contiene los elementos básicos.
- *Examples*: Será el paquete objeto a contener los ejemplos de fotobiorrectores que se diseñen haciendo uso de los componentes de la librería, es decir, los sistemas completos como el de la Figura 6.
- *Icons*: Contiene las descripciones gráficas de cada uno de los modelos.
- *Interfaces*: Aquí se encuentran los conectores diseñados, así como el conjunto de modelos parciales que describen las interfaces.
- *Parts*: Dentro de este paquete se encuentran los modelos que más se asimilan a los componentes físicos reales, es decir, la columna, el lazo, las bombas, los depósitos, etc.
- *Records*: Es donde se almacenan los registros, es decir, clases tipo *record* que contienen las constantes, parámetros y valores iniciales de las clases básicas y las partes.
- *Sensors*: En este paquete se almacenan los componentes que tienen un comportamiento similar al que tendrían los sensores físicos. Se separan del paquete *Parts* porque, a diferencia de estos, no van a modificar el comportamiento dinámico del sistema que se modele, sino que serán una herramienta para extraer información, ya sea para un registro de datos más claro o para el uso en los posibles bucles de control.
- *Users Guide*: Paquete de documentación que contendrá la información más relevante sobre la librería.
- *Utilities*: Clases que servirán como herramientas para la simulación, como por ejem-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

plo para la lectura de ficheros o tratamiento de datos de entrada.

4. RESULTADOS

En la Figura 6 se mostró la composición de un fotobiorreactor cerrado, el cual se corresponde con el descrito en [4] y representa a un sistema real que se encuentra en la *Estación Experimental de las Palmerillas*, en Almería.

La planta anteriormente mencionada está formada por una columna de burbujeo, un intercambiador de calor, un lazo, distintas bombas, inyectores de gas y sensores. La columna de burbujeo, además de mezclar el cultivo y extraer parte del oxígeno del mismo, a través de la inyección de aire en su base, es el punto en donde se inyecta nuevo medio de cultivo y de donde se extrae la biomasa. La inyección de medio de cultivo se realiza en la base y el cosechado tiene lugar por desbordamiento en la parte superior. Dentro de la columna se encuentra el intercambiador de calor, encargado de calentar o enfriar el cultivo en función del caudal y temperatura del agua que pase por su interior. A la entrada y salida de la columna está conectado el lazo, formado por una tubería serpenteante en cuyo inicio de la misma se produce una inyección de CO_2 que alimenta el proceso de fotosíntesis que da como resultado la generación de nueva biomasa y O_2.

En la Figura 7 se muestra la radiación solar que incide en el fotobiorreactor el día 4 de febrero de 2014, en la Figura 8 el caudal de CO_2 que se inyecta en el lazo durante el experimento y en la Figura 9 algunas de las temperaturas medidas.

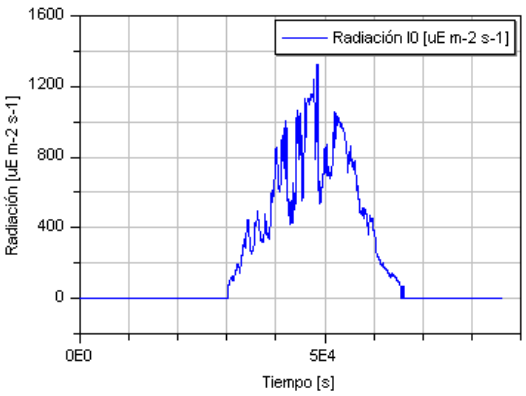


Figura 7: Radiación solar el 4 de febrero de 2014

Con las entradas anteriormente descritas se han medido en la planta real distintas variables que sirven para validar si el modelo construido con la librería realiza un cálculo correcto de las mismas.

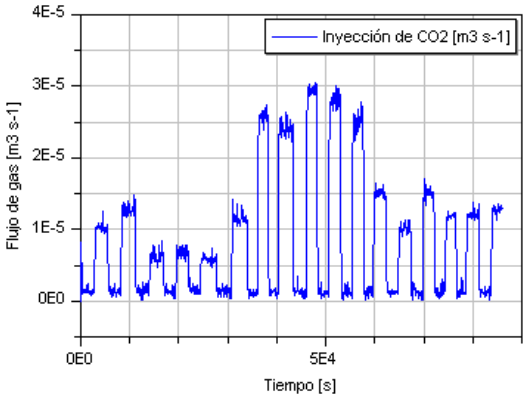


Figura 8: Inyección de CO_2 en el lazo

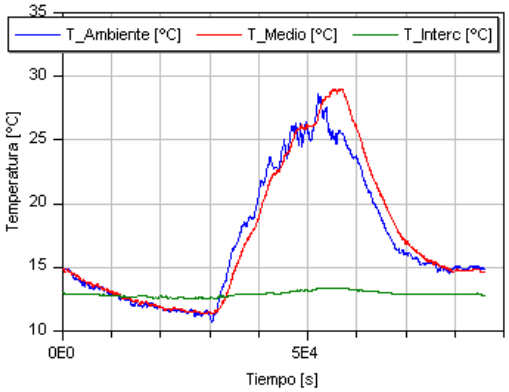


Figura 9: Temperaturas en el fotobiorreactor

Se muestran dos de las variables validadas: el pH a la salida del lazo, Figura 10 y la temperatura del cultivo a la entrada del lazo, Figura 11. Además, en la Figura 12 se muestra la evolución de la concentración de biomasa a la entrada y salida del lazo, medida no sensorizada en la planta cuando se realizó el experimento y que proporciona una estimación de la producción que, de otra forma, sería difícil obtener.

Como se ha podido observar en las Figuras 10 y 11, la librería es capaz de simular fielmente el comportamiento de un fotobiorreactor real. Además, una de las grandes ventajas de esta librería son los tiempos de simulación. En la Tabla 2 se muestran los tiempos que se han obtenido al simular el ejemplo presentado en la Sección 3.2 y descrito por la Figura 6, haciendo uso de distintos algoritmos. Todas las simulaciones se han realizado en la versión 6.1 de *Dymola*, sobre una máquina virtual de *Windows XP*, a la cual solo se le permite el acceso a un único núcleo del procesador. La maquina virtual corre sobre un ordenador portatil *MacBook Pro* con un procesador *i7* de primera generación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

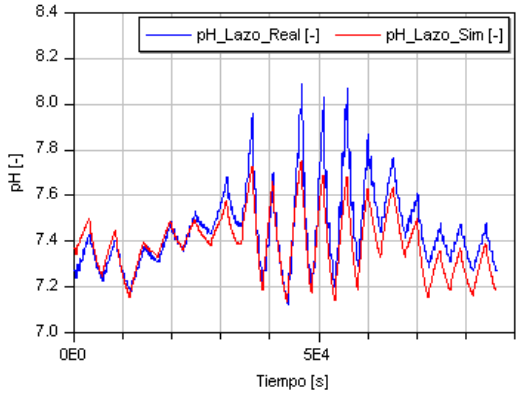


Figura 10: *pH* del cultivo a la salida del lazo

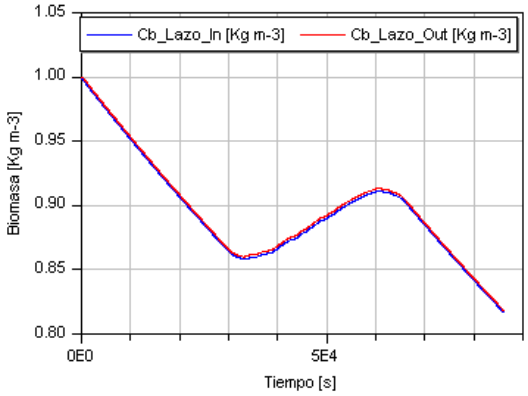


Figura 12: Concentración de biomasa a la entrada y salida del lazo

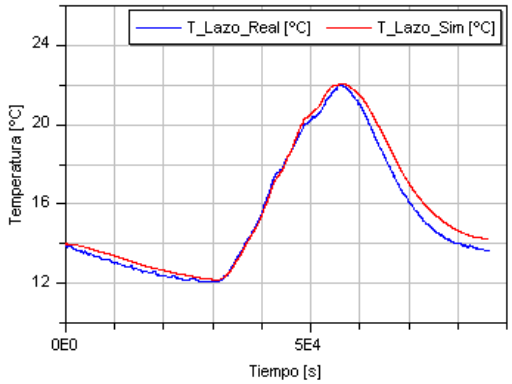


Figura 11: Temperatura del cultivo a la entrada del lazo

Tabla 2: Tiempos de simulación en función del algoritmo y la sensibilidad

Algoritmo	Sensibilidad	Tiempo de simulación
Dassl	10^{-5}	125,00 *s*
	10^{-10}	300,00 *s*
Dopri45	10^{-5}	2,61 *s*
	10^{-10}	10,09 *s*
Esdirk45a	10^{-5}	48,34 *s*
	10^{-10}	155,00 *s*
Lsodar	10^{-5}	3,19 *s*
	10^{-10}	9,42 *s*

Todos los resultados de la Tabla 2 han obtenido las mismas salidas, además de detectar el mismo número de eventos de estado. Las gráficas de simulación que se muestran en esta sección se han obtenido utilizando el algoritmo *Dopri45* con una sensibilidad de 10^{-10}.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En las secciones anteriores se ha presentado la librería diseñada para el modelado y simulación de fotobiorreactores *PhotoBioLib*, las principales ventajas que aporta el uso de esta librería sobre otras opciones son:

- Modelos basados en primeros principios. Lo cual aporta ventajas sobre modelos basados en funciones de transferencia, cajas negras o otras estrategias.
- Gran potencial de configuración. A partir de las partes preconstruidas y las clases básicas se podrá construir, sencilla y rápidamente, cualquier tipo de fotobiorreactor.
- Facilidad de uso. Puede ser utilizado por cualquier usuario sin necesidad de tener conocimientos previos de programación, arrastrando y uniendo las distintas partes.
- Gran parecido de los modelos con la realidad. Se pueden construir modelos añadiendo partes y sensores como si se tratara de un sistema real. Esto por un lado permite reproducir fácilmente plantes reales ya existentes y, por otro, el crear plantas o probar modificaciones de las mismas en simulación antes de implementarlo en la realidad.
- Velocidad de simulación. El uso del lenguaje *Modelica* y más concretamente del entorno *Dymola*, permiten que modelos con miles de ecuaciones y tiempos largos de simulación, con pequeños muestreos, como el diseñado en la Figura 6, puedan simular días completos en menos de 3 segundos. Esto es posible debido a que la herramienta *Dymola* realiza un pretratamiento de las ecuaciones diferenciales para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

posteriormente traducir el modelo a lenguaje *C*, siendo esto transparente para el usuario.

- Gran facilidad para la interconexión con otros modelos o librerías. A los modelos creados con la librería *PhotoBioLib* se pueden incluir otros componentes ya disponibles en *Modelica* como bloques para el tratamiento de señales o controladores, o otras librerías como, por ejemplo, alguna que modele la temperatura dentro de un invernadero para simular el comportamiento de un fotobiorreactor dentro del mismo.

Respecto a las posibles mejoras que se pueden incluir en la librería se destacan las siguientes:

- Creación de componentes y ejemplos para la simulación de otros tipos de fotobiorreactores. En la actualidad ya está en desarrollo la ampliación de la librería para la simulación de fotobiorreactores abiertos del tipo *raceway*.
- Inclusión de modelos para la simulación de la radiación solar y la temperatura de cualquier parte del mundo en cualquier fecha deseada. En la próxima versión de la librería ya se va a incluir un modelo para la simulación de la radiación en función de la fecha, la longitud y la latitud.
- Implementación de un paquete de controladores. Especialmente de control predictivo basado en modelo.
- Posibilidad de sintonizar los parámetros y validar los modelos a partir de datos registrados de sistemas reales y de una forma más o menos automática.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad en virtud de los proyectos DPI2011-27818-C02-01 y DPI2011-27818-C02-02 y de la beca FPI enmarcada en este último. Y del proyecto CENIT VIDA financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y el CDTI.

Referencias

[1] K. Cheenkachorn, N. Choosri, A. Chutrapukdeekul, and T. Kangsadan. Computational Modeling of Microalgae Culture Using a Helical Photobioreactor. In *Recent Advances in Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer*, volume 2, pages 300–305, 2011.

[2] T. A. Costache, F. G. Acién, M. M. Morales, J. M. Fernández, I. Stamatin, and E. Molina. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(17):7627–37, Sept. 2013.

[3] R. Davis, A. Aden, and P. T. Pienkos. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*, 88(10):3524–3531, Oct. 2011.

[4] I. Fernández, F. G. Acién, J. M. Fernández, J. L. Guzmán, J. J. Magán, and M. Berenguel. Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors. *Bioresource technology*, 126:172–81, Dec. 2012.

[5] V. Goetz, F. Le Borgne, J. Pruvost, G. Plantard, and J. Legrand. A generic temperature model for solar photobioreactors. *Chemical Engineering Journal*, 175:443–449, Nov. 2011.

[6] P. Iancu, V. Ple, and S. Velea. Flue Gas CO 2 Capture by Microalgae in Photobioreactor : a Sustainable Technology. *Chemical Engineering Transactions*, 29(2006):799–804, 2012.

[7] J. Miñon Martinez. *Modelo de biomasa algal para la captura de dióxido de carbono y su desarrollo en un software de evaluación*. PhD thesis, Universidad de Valladolid, 2012.

[8] V. Papáček, V. Štumbauer, D. Štys, K. Petera, and C. Matonoha. Growth impact of hydrodynamic dispersion in a Couette–Taylor bioreactor. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(7-8):1791–1795, Oct. 2011.

[9] A. Pérez-Castro. PhotoBioLib: una librería de Modelica para el modelado y simulación de fotobiorreactores. Master's thesis, UNED, 2014.

[10] K. J. Sink. *Design and Construction of a Lighting System to Illuminate a Photobioreactor*. PhD thesis, Ohio University, 2011.

[11] B. Tamburic, F. W. Zemichael, P. Crudge, G. C. Maitland, and K. Hellgardt. Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11):6578–6591, June 2011.

[12] L. B. Wu, Z. Li, and Y. Z. Song. Hydrodynamic conditions in designed spiral photobioreactors. *Bioresource technology*, 101(1):298–303, Jan. 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL DE UN ASCENSOR COMO CASO PRÁCTICO PARA LA DOCENCIA DE CONTROL AVANZADO

Adrián Peidró, Arturo Gil, José María Marín, Luís Payá, Óscar Reinoso
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández
Avda. Universidad s/n, Edificio Innova
03202 - Elche (Alicante), España
adrian.peidro@goumh.umh.es

Resumen

Se presenta un problema práctico de control de un ascensor no lineal con cargas variables, incluyendo su modelado, identificación, discretización y control tanto en simulación como con una maqueta real del ascensor. Dicho problema permite introducir esquemas adaptativos de control de sistemas no lineales a alumnos de asignaturas de ingeniería de control mediante un caso práctico completo. El esquema de control adaptativo estudiado es robusto en el sentido de que no requiere un conocimiento perfecto de los parámetros del sistema, admitiendo cierto error. Los experimentos con la maqueta revelan aspectos prácticos de implementación normalmente obviados en simulación y que son importantes en la formación de ingenieros.

Palabras clave: Linealización por Realimentación, control, ascensor, identificación, RLS

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el problema de control de un ascensor no lineal donde la carga transportada varía de forma desconocida, requiriéndose un mecanismo de adaptación para controlarlo con precisión. El ejemplo práctico que se propone puede utilizarse para iniciar a los alumnos de asignaturas de control avanzado en técnicas adaptativas de control no lineal mediante un sistema más sencillo que otros sistemas no lineales tradicionalmente utilizados en la enseñanza, como el clásico péndulo invertido. Además se trata de un proyecto integral que abarca numerosos conceptos fundamentales para todo investigador o profesional del ámbito de la ingeniería de control: aplicación práctica del control, modelado matemático de sistemas dinámicos, discretización e identificación, simulación del control e implementación con equipamiento real.

El esquema de control no lineal y adaptativo estudiado es una combinación de la técnica de Linealización por Realimentación (*Feedback Linearization*) con identificación en línea por mínimos cuadrados. Esta combinación de técnicas ha sido estudiada por otros autores para controlar motores síncronos y asíncronos ([1], [9], [5]), sistemas caóticos discretos [8], robots móviles ([3], [6]), el pH de un proceso [7] o la fuerza en un sistema robótico de inyección de células [11], pero no se ha aplicado para controlar un ascensor.

El problema estudiado en este artículo es el resultado de un trabajo realizado por uno de los autores durante el curso académico 2013-2014 como alumno de la asignatura de Ingeniería de Control del Máster en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación de la Universidad Miguel Hernández. Dicha asignatura presenta técnicas avanzadas de control que generalmente no se estudian, o se estudian superficialmente, en asignaturas de ingeniería industrial, como control inteligente, no lineal, multifrecuencia o adaptativo. La asignatura se evalúa mediante la realización de un trabajo sobre cualquier técnica avanzada de control, teniendo los alumnos total libertad para plantear su proyecto, fomentándose así su motivación y creatividad.

El resto del artículo está organizado como sigue. La Sección 2 revisa la técnica de Linealización por Realimentación. En la Sección 3 se modela la dinámica del ascensor a controlar. A continuación, dicho control se simula en la Sección 4 suponiendo que la carga del ascensor es constante. Las limitaciones del controlador diseñado cuando la carga varía se analizan en la Sección 5, sugiriéndose la mejora del controlador mediante técnicas de adaptación. En la Sección 6 se discretiza el modelo del ascensor para su identificación, presentándose en la Sección 7 el identificador a utilizar. El funcionamiento del esquema resultante se analiza en simulación en la Sección 8, probándose sobre una maqueta real del ascensor en la Sección 9. Finalmente, la Sección 10 concluye este artículo.

2. LINEALIZACIÓN POR REALIMENTACIÓN

En esta sección se revisa la técnica de Linealización por Realimentación (LR) para controlar sistemas dinámicos de la forma siguiente:

$$\ddot{y} = f\left(y, \dot{y}\right) + g\left(y, \dot{y}\right) u \qquad (1)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

donde $y \in \mathbb{R}$ es la salida y $u \in \mathbb{R}$ es la entrada. f y g son funciones no lineales que dependen de y y $\dot{y}$ (en adelante se omitirá esta dependencia explícita en la notación) con $g(y, \dot{y}) \neq 0$. El objetivo de control es que la salida $y(t)$ siga una trayectoria deseada $y_d(t)$. El control LR pretende cancelar las no linealidades de (1) para que el sistema controlado se comporte de forma lineal, aplicando la siguiente ley de control:

$$u = \frac{\ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - f}{g} \tag{2}$$

donde el error de seguimiento $e = y - y_d$ es la diferencia entre la salida real y la deseada. Al sustituir u de (2) en (1)

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= f + g\frac{\ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - f}{g} \\ &= f + \ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - f \\ &= \ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\ddot{y} - \ddot{y}_d + k_2 \dot{e} + k_1 e = \ddot{e} + k_2 \dot{e} + k_1 e = 0 \tag{4}$$

se tiene que el error de seguimiento evoluciona según una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden. Si k_1 y k_2 se escogen de forma que las raíces del polinomio característico asociado a la anterior ecuación diferencial

$$s^2 + k_2 s + k_1 = 0 \tag{5}$$

tienen todas parte real negativa, entonces el error convergerá a cero y la salida y del sistema seguirá a la trayectoria deseada y_d. La técnica de LR funciona siempre que el modelo utilizado para calcular la acción de control u en (2) describa la dinámica del sistema con suficiente precisión, en otro caso el control podría no conseguirse. Efectivamente, supóngase que la dinámica del sistema a controlar obedece la siguiente ecuación diferencial donde las funciones $\tilde{f}$ y $\tilde{g}$ no coinciden exactamente con las funciones f y g utilizadas para modelar dicho sistema:

$$\ddot{y} = \tilde{f} + \tilde{g}u \tag{6}$$

Cuando la acción de control u empleada para controlar este sistema se calcula según (2) usando las funciones f y g, la ecuación del sistema en bucle cerrado será

$$\ddot{y} = \tilde{f} + \tilde{g}\frac{\ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - f}{g} \tag{7}$$

Dado que $f \neq \tilde{f}$ y $g \neq \tilde{g}$, los términos no pueden cancelarse como en la ecuación (3) luego el sistema en bucle cerrado no obedecerá (4) y el error no evolucionará a cero necesariamente, por lo que la trayectoria deseada podría no seguirse. En la siguiente sección se modelará la dinámica de un ascensor, para posteriormente controlarlo utilizando la técnica LR presentada en este apartado.

3. DINÁMICA DEL ASCENSOR

La Figura 1 muestra el ascensor a controlar. El ascensor es impulsado por un motor DC y dispone de un eje, una polea y una cabina que transporta cargas. La entrada u a este sistema es el voltaje aplicado al motor, y su salida y es la posición vertical de la cabina, medida positiva hacia abajo. Asumiendo un motor DC de imán permanente con inductancia despreciable, la ecuación (8) es el equivalente eléctrico del motor (Figura 2a):

$$u = RI + k_v \dot{\phi} \tag{8}$$

donde u es el voltaje aplicado, R es la resistencia entre terminales, I es la corriente, k_v es la constante de velocidad-fuerza contraelectromotriz y ϕ es la posición angular del rotor del motor. Como muestra la Figura 2b, el par electromagnético generado por la corriente eléctrica debe mover el rotor, la reductora, el eje, la polea y la cabina del ascensor, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\tau = k_i I = (J_r + J_g)\ddot{\phi} + \frac{1}{n}\left(J_{ep}\frac{\ddot{\phi}}{n} - Tr\right) \tag{9}$$

en la que k_i es la constante de par, J_r es la inercia del rotor, J_g es la inercia de la reductora reducida al eje del motor, $n > 1$ es el factor de reducción, J_{ep} es la inercia del conjunto eje-polea, T es la tensión del cable y r es el radio de la polea. Finalmente, la segunda ley de Newton establece el movimiento de la cabina (véase la Figura 2c):

$$m_c \ddot{y} = m_c g - T \tag{10}$$

donde m_c es la masa de la cabina (incluida la carga transportada), y es la posición vertical de la cabina y $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ es la aceleración de la gravedad. Además, se asumirá que el cable no desliza sobre la polea, obteniéndose dos ecuaciones adicionales:

$$\dot{y} = r\dot{\phi}n^{-1}, \quad \ddot{y} = r\ddot{\phi}n^{-1} \tag{11}$$

Combinando las ecuaciones (8) a (11) se obtiene una única ecuación diferencial relacionando y y u:

$$\ddot{y} = c_1 \dot{y} + c_2 u + c_3 \tag{12}$$

donde los coeficientes c_i son:

$$c_1 = -\frac{k_i k_v n^2}{J_T R}, \quad c_2 = \frac{r k_i n}{J_T R}, \quad c_3 = \frac{m_c r^2 g}{J_T} \tag{13}$$

y $J_T = n^2(J_g + J_r) + J_{ep} + m_c r^2$. Para simular este sistema se utilizarán los siguientes valores numéricos para los parámetros, que pertenecen a equipos reales: $R = 21{,}5\ \Omega$, $k_v = 0{,}0212\ \mathrm{V \cdot rad^{-1} \cdot s}$, $k_i = 0{,}0212\ \mathrm{N \cdot m \cdot A^{-1}}$, $J_r = 4{,}2 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{kg \cdot m^2}$, $J_g = 0{,}4 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{kg \cdot m^2}$, $n = 62$, $J_{ep} = 287{,}584 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{kg \cdot m^2}$, $r = 0{,}0425\ \mathrm{m}$, $m_c = 0{,}18\ \mathrm{kg}$.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

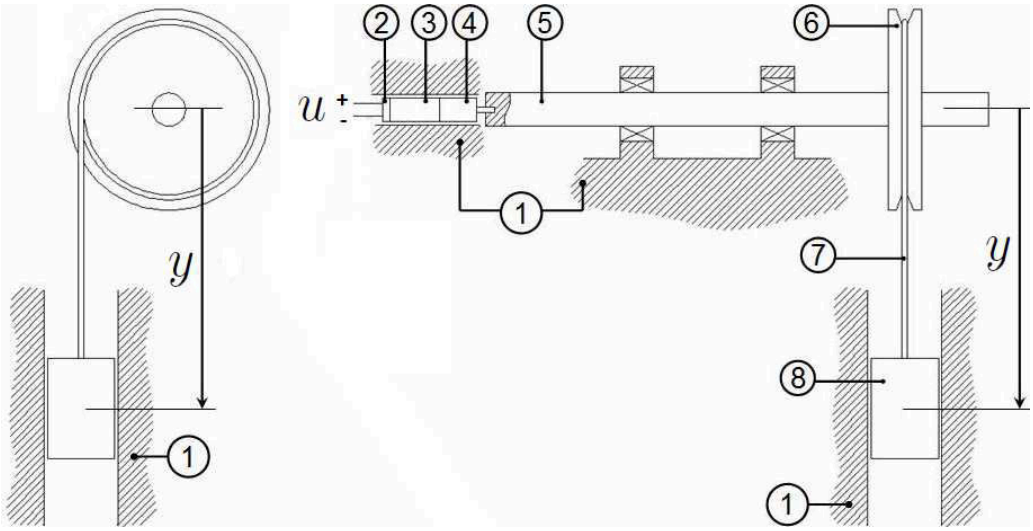


Figura 1: Partes del ascensor a controlar. 1) Bastidor. 2) Encoder para medir la posición. 3) Motor DC. 4) Reductora para incrementar el par del motor. 5) Eje. 6) Polea. 7) Cable. 8) Cabina.

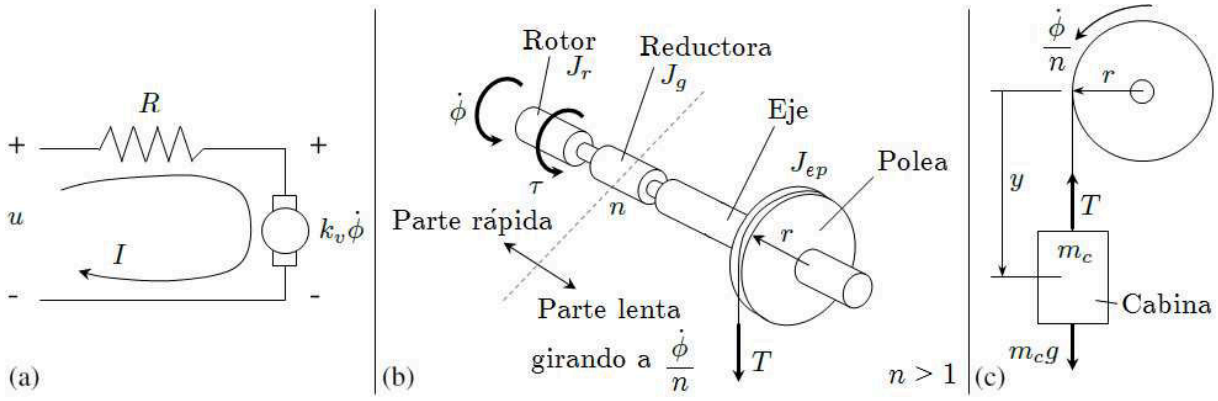


Figura 2: Partes del modelo dinámico del ascensor. (a) Circuito equivalente del motor DC. (b) Dinámica de las partes rotativas del sistema. (c) Fuerzas que actúan sobre la cabina del ascensor.

4. CONTROL DEL ASCENSOR

En esta sección se estudia el control del ascensor para que éste siga la trayectoria periódica de la Figura 3, que es una onda casi trapezoidal obtenida al saturar entre 0,45 m y 0,05 m un seno de amplitud y valor medio de 0,25 m y una frecuencia de 0,5 rad $\cdot$ s^{-1}. Esta trayectoria simula el transporte de cargas entre dos pisos (Figura 4); cuando el ascensor llega a uno de los pisos se detiene durante unos segundos para cargar o descargar.

El movimiento del ascensor está gobernado por la ecuación diferencial (12), que relaciona la posición del ascensor con la tensión aplicada al motor. Esta ecuación es no lineal en términos de entrada-salida debido a la existencia del término independiente c_3, que no multiplica a y, u ni a ninguna de sus derivadas. Para controlar este sistema se utilizará la técnica LR presentada en la sección 2. La ecuación (12) puede escribirse como (1) identificando

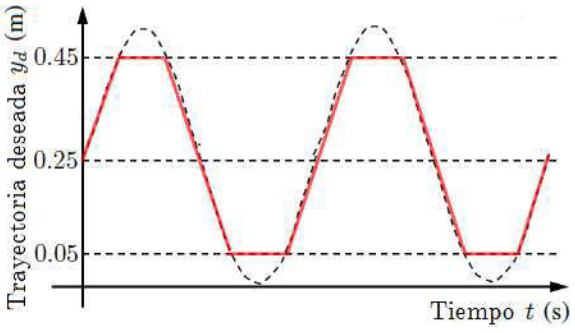


Figura 3: La trayectoria deseada es una onda casi trapezoidal obtenida saturando un seno.

las funciones f y g: $f = c_1\dot{y} + c_3$ y $g = c_2$. Si (12) reproduce con suficiente precisión la dinámica del ascensor, entonces la siguiente acción de control cancelará las no linealidades del sistema

$$u = \frac{\ddot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - c_1 \dot{y} - c_3}{c_2} \qquad (14)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

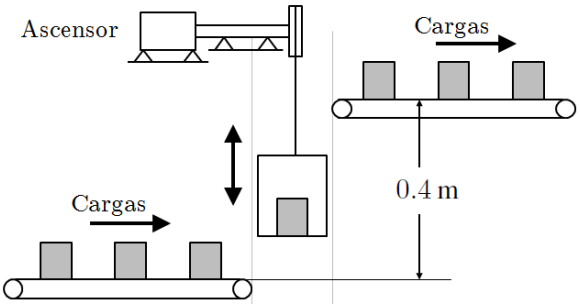


Figura 4: Aplicación práctica del problema.

y el error de seguimiento evolucionará según (4), que fuerza al error a converger hacia cero para cualquier condición inicial si k_1 y k_2 son ambas positivas. Dicha evolución depende de k_1 y k_2, que determinan las raíces de la ecuación característica (5) asociada a (4). Cuando dichas raíces tienen parte imaginaria no nula, se producen oscilaciones en el seguimiento debido a los términos senoidales de la solución de la ecuación diferencial. Para evitar estas oscilaciones, k_1 y k_2 se elegirán para obtener raíces reales negativas. Además se impondrá que dichas raíces sean iguales para simplificar el análisis, luego $k_1 = (k_2/2)^2$. El diseño del regulador se realizará simulando en Simulink el sistema controlado para diversos valores de $k_2 > 0$. Las simulaciones se realizarán con los valores numéricos indicados al final de la sección anterior, que proporcionan los siguientes coeficientes: $c_1 = -33{,}75\ \mathrm{s}^{-1}$, $c_2 = 1{,}09\ \mathrm{m \cdot s^{-2} \cdot V^{-1}}$ y $c_3 = 1{,}34\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Las simulaciones demuestran que si k_2 es pequeño el seguimiento es pobre y lento, y que cuanto mayor es k_2 más fiel es el seguimiento de la trayectoria, de modo que si k_2 es lo suficientemente elevado (p.e. $k_2 = 40$) se logra un seguimiento perfecto en todo momento. No obstante, al aumentar k_2 para lograr un seguimiento rápido también crece la acción de control u, que es la tensión aplicada al motor. En la práctica los amplificadores que alimentan a los motores se saturan en un límite de tensión, que aquí se supondrá de 24 V. De modo que se incluirá la condición de diseño: $|u(t)| \leq 24\ \mathrm{V}\ \forall t$. Tras varias simulaciones se escoje el valor $k_2 = 11$, que permite un buen seguimiento (Figura 5) y produce unas tensiones máximas de 24 V durante el transitorio inicial de dicho seguimiento (Figura 6). Mayores valores de k_2 producen tensiones por encima de 24 V.

5. LIMITACIONES DEL CONTROLADOR DISEÑADO

El controlador diseñado en la sección anterior ($k_1 = 30{,}25$, $k_2 = 11$) hace uso del modelo del

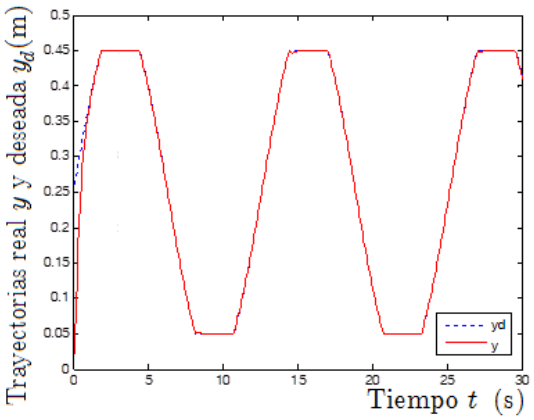


Figura 5: Seguimiento para $k_2 = 11$. Comparación de la trayectoria deseada (línea punteada) y real (línea continua).

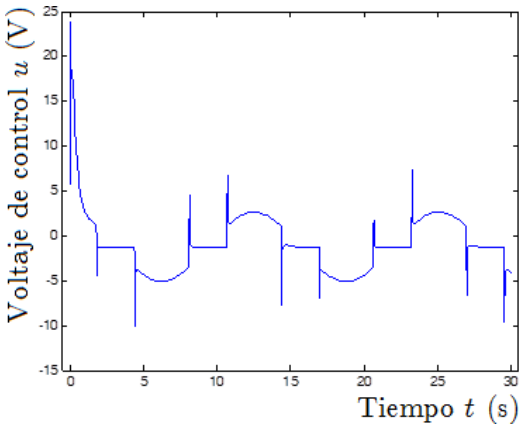


Figura 6: Tensión de control a lo largo de la trayectoria para $k_2 = 11$.

ascensor sin carga en su cabina, consiguiéndose un buen control. Si se incluye una carga, la masa m_c cambia y los parámetros c_i del modelo del ascensor también varían. Si el modelo que emplea el controlador no se actualiza en consecuencia, las no linealidades del ascensor podrían no compensarse y el controlador podría no funcionar.

Para verificar la validez del controlador diseñado cuando varía la carga transportada, se simulará que en el instante $t = 22$ s se añade una carga de 1 kg a la cabina, tomando nuevos valores los coeficientes del sistema: $c_1 = -19{,}19\ \mathrm{s}^{-1}$, $c_2 = 0{,}62\ \mathrm{m \cdot s^{-2} \cdot V^{-1}}$ y $c_3 = 4{,}99\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$. En la Figura 7 se observa que tras el incremento de carga el controlador no consigue forzar el seguimiento de la trayectoria porque los parámetros c_1, c_2 y c_3 empleados por el controlador (que ha sido diseñado para el ascensor en vacío) ya no coinciden con los nuevos coeficientes de la ecuación diferencial del ascensor, luego no puede cancelarse el modelo y el error no obedece (4).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

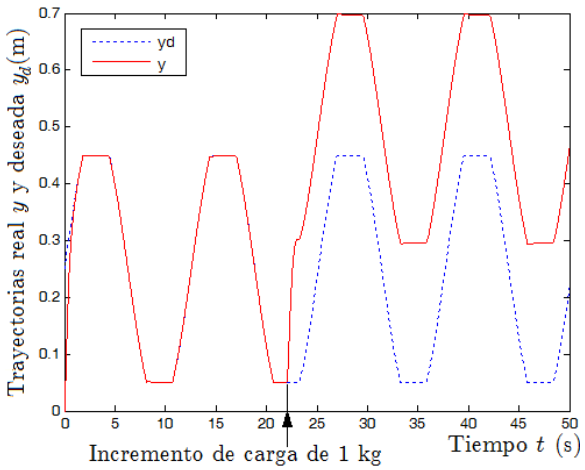


Figura 7: En $t = 22$ s la carga transportada aumenta en 1 kg y la dinámica del ascensor ya no obedece al modelo usado por el controlador.

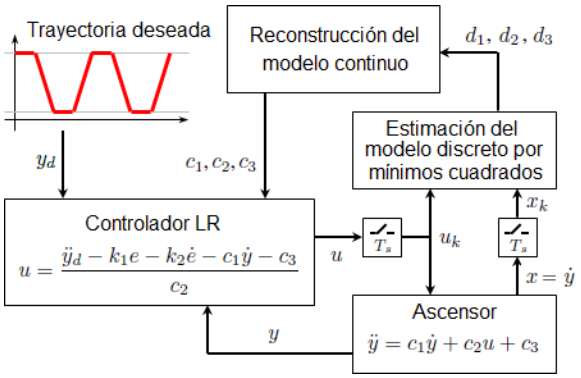


Figura 8: Esquema adaptativo para identificar y controlar el ascensor de forma simultánea cuando se producen cambios de carga.

Esta es la limitación de la técnica de Linealización por Realimentación: precisa un modelo fiel al proceso. La situación se agrava cuando se desconoce cómo varían los parámetros del proceso, p.e. si se supone que las cargas transportadas por el ascensor pueden tomar cualquier valor aleatorio. Para que el controlador LR siga funcionando con cargas aleatorias, se deben ajustar sus parámetros de acuerdo a la variación de carga en el ascensor. Para lograr esto se va a incorporar un identificador en línea que estime en todo momento los coeficientes c_1, c_2 y c_3 de la dinámica del ascensor para actualizar el controlador. Para ello se va a utilizar un algoritmo discreto de identificación, a continuación se van a reconstruir los parámetros continuos a partir del modelo discreto identificado y se va a actualizar el controlador LR con los parámetros continuos, según el esquema de la Figura 8.

6. DISCRETIZACIÓN DEL MODELO DEL ASCENSOR

El esquema adaptativo propuesto requiere discretizar el modelo del ascensor. La Ecuación (12) puede rescribirse de la siguiente manera:

$$\dot{x} = [c_1]\, x + [c_2 \; c_3] \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

donde $x = \dot{y}$ es la velocidad de la cabina. Si la acción de control u es constante entre instantes de muestreo, se puede demostrar [4] que el siguiente modelo es una discretización exacta de (15):

$$x_{k+1} = d_1 x_k + d_2 u_k + d_3 \tag{16}$$

donde $x_k = x\,(kT_s)$, T_s es el periodo de muestreo y

$$d_1 = e^{c_1 T_s}, \quad d_i = \frac{e^{c_1 T_s} - 1}{c_1} c_i, \;\; i = 2, 3 \tag{17}$$

son los parámetros del modelo discreto. Mediante un identificador en línea pueden estimarse los parámetros d_1, d_2 y d_3 e invertir las anteriores relaciones para despejar los parámetros continuos c_i con los que actualizar el controlador. No obstante, esto no siempre es posible: c_1 es proporcional al logaritmo de d_1 y el valor estimado de d_1 podría tornarse temporalmente negativo durante el proceso de identificación (especialmente cuando se detecta un cambio de carga). El logaritmo no está definido para argumentos negativos, luego el control quedaría temporalmente indefinido y el sistema podría desestabilizarse.

Esto puede evitarse si se utiliza una discretización aproximada. Si T_s es lo suficientemente pequeño, las exponenciales en (17) se pueden aproximar por $e^{c_1 T_s} \approx 1 + c_1 T_s$ y las relaciones se tornan lineales

$$d_1 = 1 + c_1 T_s, \quad d_2 = c_2 T_s, \quad d_3 = c_3 T_s \tag{18}$$

pudiéndose invertir sin problemas. En este artículo se utilizará la discretización aproximada con $T_s = 0{,}01$ s, que es suficiente para hacer válida la aproximación según se desprende de las simulaciones realizadas en bucle abierto.

7. IDENTIFICACIÓN EN LÍNEA DEL MODELO DISCRETO

El algoritmo recursivo de identificación por mínimos cuadrados (RLS en inglés) permite estimar en línea los parámetros de sistemas que son lineales en dichos parámetros, es decir, sistemas de la forma

$$x_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{\theta} \tag{19}$$

donde $\boldsymbol{\varphi}_{k+1} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ es el vector de regresión, que depende de manera no lineal de entradas y salidas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

pasadas y $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{p\times 1}$ es el vector con los parámetros a estimar. El modelo discreto (16) del ascensor puede escribirse como (19) con $\boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T = [x_k \; u_k \; 1]$ y $\boldsymbol{\theta} = [d_1 \; d_2 \; d_3]^T$ ($p = 3$), luego puede identificarse mediante este algoritmo. De forma general, el identificador RLS estima los parámetros mediante las siguientes ecuaciones recursivas:

$$\boldsymbol{L}_{k+1} = \frac{\boldsymbol{P}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}}{\frac{\lambda_{1,k}}{\lambda_{2,k}} + \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{P}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \boldsymbol{L}_{k+1}\left(x_{k+1} - \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{\theta}_k\right) \tag{21}$$

$$\boldsymbol{P}_{k+1} = \left(\boldsymbol{I}_p - \boldsymbol{L}_{k+1}\boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T\right)\frac{\boldsymbol{P}_k}{\lambda_{1,k}} \tag{22}$$

donde $\boldsymbol{\theta}_k$ es actualizado según (21) utilizando las entradas y salidas medidas. $\boldsymbol{L}_k \in \mathbb{R}^{p\times 1}$ y $\boldsymbol{P}_k \in \mathbb{R}^{p\times p}$ son respectivamente las matrices de ganancia y covarianza, mientras que $\lambda_{1,k}$ y $\lambda_{2,k}$ son los factores de olvido. $\boldsymbol{I}_p$ es la matriz identidad de tamaño p. Los factores de olvido se introducen para que el algoritmo pueda detectar cambios en los parámetros (cambios de carga en el ascensor), ya que la forma estándar del algoritmo RLS (dada por $\lambda_{1,k} = \lambda_{2,k} = 1$) supone que los parámetros son constantes y pierde la capacidad de detectar cambios en los mismos transcurrido cierto tiempo.

Una elección común para evitar esto es tomar $\lambda_{2,k} = 1$ y $\lambda_{1,k} = \lambda_1 \in (0, 1)$ ([1], [9]), de forma que las medidas más recientes tienen más peso en la estimación. Esta elección, no obstante, puede provocar inestabilidad en la estimación si el sistema no se excita lo suficiente durante la identificación [2], luego no se adoptará esta solución para identificar el ascensor pues también podría desestabilizar el control.

La pérdida de la capacidad de detectar cambios en los parámetros o la inestabilidad en la estimación se producen respectivamente porque la matriz de covarianza $\boldsymbol{P}$ se hace muy pequeña o crece desmesuradamente. Una opción más sofisticada para los factores de olvido es la siguiente:

$$\lambda_{1,k} = 1 - \frac{\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{P}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}\boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{P}_k\right)}{\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{P}_k\right)\left(a + \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{P}_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}\right)} \tag{23}$$

$$\lambda_{2,k} = a^{-1}\lambda_{1,k} \tag{24}$$

Esta elección evita los dos problemas mencionados porque fuerza a que la traza de la matriz $\boldsymbol{P}$ sea constante. Para identificar el modelo discreto del ascensor se emplearán las ecuaciones (23) y (24) con $a = 1$. Además, como condiciones iniciales para las ecuaciones recursivas (20)-(22) se tomará $\boldsymbol{P}_0 = 5\boldsymbol{I}_3$, mientras que los parámetros $\boldsymbol{\theta}_0$ se inicializarán como números aleatorios uniformes en (0, 1).

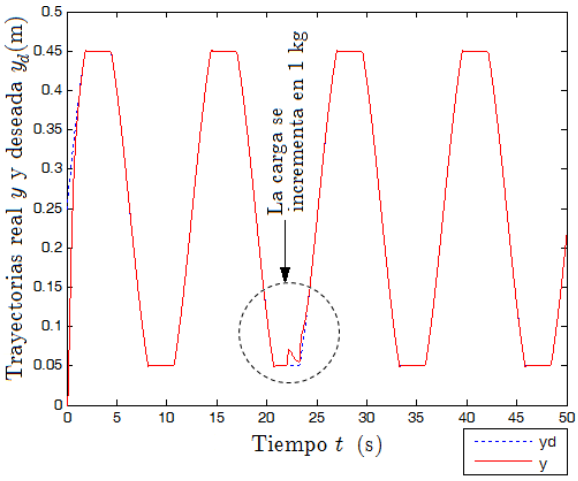


Figura 9: Respuesta de control con identificación en línea. La trayectoria es temporalmente perturbada tras el cambio de masa (zona rodeada), pero se corrige rápidamente cuando los nuevos parámetros son estimados.

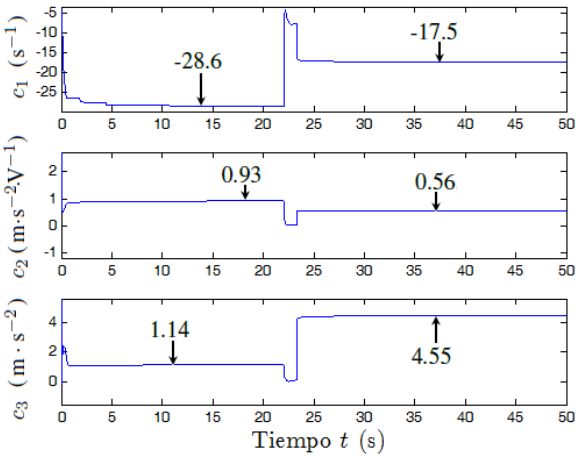


Figura 10: Gráficas con los parámetros c_1, c_2 y c_3 estimados por el algoritmo RLS durante la simulación.

8. CONTROL ADAPTATIVO DEL ASCENSOR

En esta sección se simula el esquema de control completo de la Figura 8, incluyendo el identificador discreto y el reconstructor del modelo continuo. En la Figura 9 se muestra el seguimiento de la trayectoria cuando la carga aumenta en 1 kg en $t = 22$ s. Cuando la carga aumenta, la trayectoria real experimenta una pequeña perturbación mientras el identificador estima los nuevos parámetros del ascensor. El controlador logra corregir la trayectoria rápidamente ante cambios de carga.

La Figura 10 muestra la estimación de los parámetros c_1, c_2 y c_3 durante la simulación. La estimación del algoritmo RLS converge hacia parámetros

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

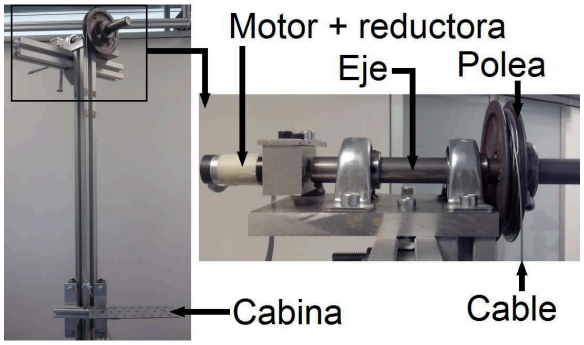


Figura 11: Maqueta construida del ascensor.

constantes antes y después del cambio de carga. No obstante, si se comparan los valores estimados de la Figura 10 con los valores numéricos reales empleados en simulación indicados en las secciones 4 y 5, se observa un error relativo del 15 % y 10 % en los parámetros estimados antes y después del cambio de carga, respectivamente. Este error se debe a la discretización aproximada empleada, pudiéndose disminuir tomando T_s más pequeños. Pese a este error, el control logra el seguimiento de la trayectoria con carga variable.

9. IMPLEMENTACIÓN EN UN ASCENSOR REAL

Se ha construido una maqueta del ascensor para validar en una planta real el esquema de control propuesto. La maqueta se muestra en la Figura 11 y contiene los mismos elementos que el sistema analizado en simulación. Las propiedades físicas indicadas en la sección 3 pertenecen a los equipos de la maqueta.

El esquema de control simulado en la sección anterior se ha probado en la maqueta, implementándolo en una tarjeta dspace1103 con un muestreo de $T_s = 0{,}01$ s. La Figura 12 muestra la respuesta de control sobre el ascensor real. El control consigue el seguimiento de la trayectoria en los tramos de subida y bajada, pero se comporta peor en los puntos extremos de la trayectoria, a los que el ascensor no logra llegar. En $t = 23{,}5$ s la carga del ascensor se incrementa en 0,7 kg, aunque esto apenas perturba la trayectoria.

La Figura 13 muestra la estimación de los parámetros durante el control. Al contrario que en simulación, las estimaciones no convergen a valores constantes. Esta diferencia se debe a diversos factores. En primer lugar, la velocidad $x = \dot{y}$ empleada por el algoritmo RLS es accesible directamente en simulación, mientras que en el sistema real se obtiene derivando la señal de posición de un encoder. Si en simulación se introduce al identificador la velocidad obtenida mediante diferenciación numérica, también se observan variaciones en la estimación.

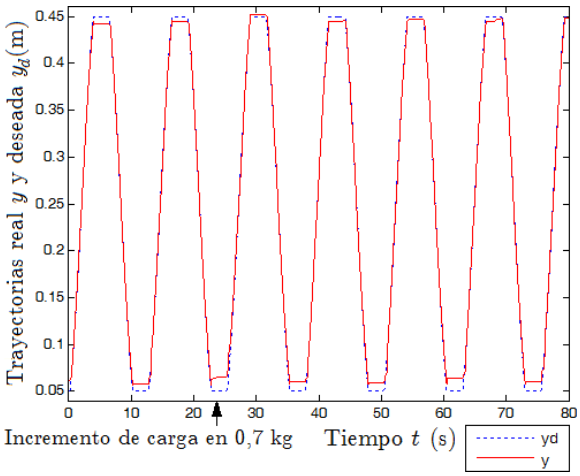


Figura 12: El controlador conduce el ascensor real por la trayectoria deseada, pero no logra un seguimiento perfecto.

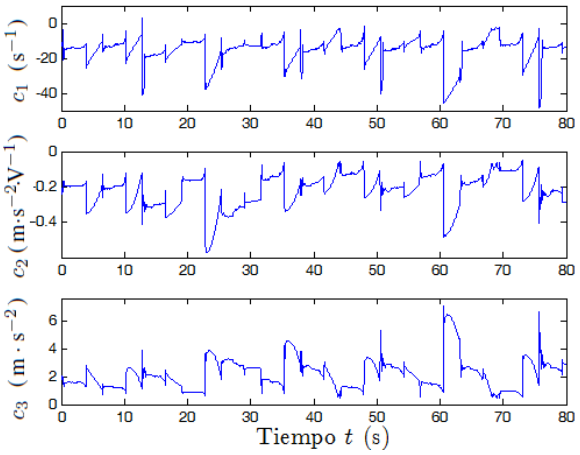


Figura 13: Estimación de los parámetros de la maqueta. Las estimaciones no convergen a constantes.

En segundo lugar, la posición y en la maqueta se obtiene de un encoder, que proporciona valores discretos de la posición, introduciendo un ruido de cuantización. Aun utilizando encoders de mucha resolución, al derivar dicha señal se obtiene una velocidad muy contaminada y difícil de filtrar [10], afectando a la calidad de las estimaciones.

La Figura 14 muestra los parámetros estimados en simulación cuando la velocidad empleada por el identificador se obtiene al derivar la señal de posición proporcionada por un encoder con una resolución de 2,8125°. Como puede comprobarse, aunque los factores mencionados no explican totalmente las variaciones observadas en la maqueta, los parámetros estimados en simulación ya no convergen a valores constantes.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

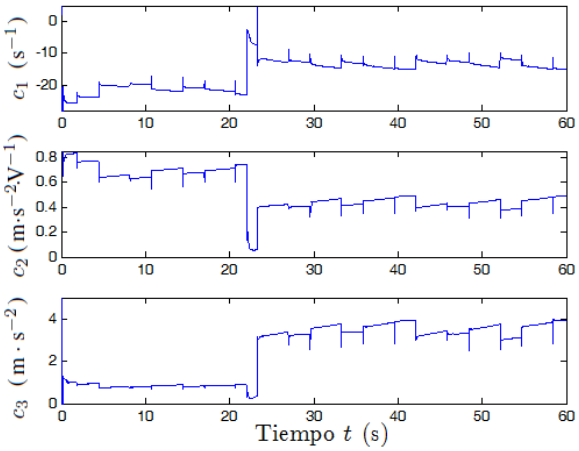


Figura 14: Estimación de los parámetros en simulación empleando la velocidad obtenida al derivar una señal de posición cuantizada.

10. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un problema planteado en una asignatura de máster para controlar un ascensor no lineal con carga variable mediante la técnica de Linealización por Realimentación con identificación por mínimos cuadrados. Este problema se propone como ejemplo didáctico para asignaturas de control en grado y máster pues permite poner en práctica mediante un ejemplo real todas las etapas de un problema de ingeniería de control: modelado, identificación, discretización, simulación e implementación en una planta real.

El problema presentado permite estudiar un esquema híbrido en el que el control no lineal emplea un modelo continuo que se estima mediante un algoritmo discreto. Se ha presentado una discretización aproximada que evita acciones de control indefinidas a costa de precisión en los parámetros estimados, que presentan errores del 15 %. Aun así, se logra un buen control, lo cual prueba la robustez del esquema estudiado.

La implementación en un ascensor real del controlador propuesto permite estudiar importantes aspectos prácticos de implementación usualmente obviados en simulación, como la aparición de ruido al derivar una señal de posición cuantizada para obtener la velocidad y su efecto en la identificación del modelo y en el control, o la saturación de la acción de control.

Para el futuro, se pretende implementar el problema planteado en forma de laboratorio virtual y remoto utilizando Easy Java Simulations para que cualquier estudiante pueda experimentar con este problema de forma remota, sumándose a la gran variedad de laboratorios virtuales y remotos de control automático disponibles en Internet.

Referencias

[1] A. Abianeh. Direct torque and flux control of ipm synchronous motor drive using input-output feedback linearization approach. In *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1813–1818, Nov 2011.

[2] K. J. Åström and B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Courier Dover Publications, 2008.

[3] H. Cho, M. Fadali, K. Lee, and N. Kim. Adaptive position and trajectory control of autonomous mobile robot systems with random friction. *Control Theory Applications, IET*, 4(12):2733–2742, December 2010.

[4] S. Dominguez, J. Sebastián, and P. Campoy. *Control en el espacio de estado*. Universidad Politécnica de Madrid, 2000.

[5] M. Hajian, J. Soltani, G. A. Markadeh, and S. Hosseinnia. Input-output feedback linearization of sensorless im drives with stator and rotor resistances estimation. *Journal of Power Electronics*, 9(4):654–666, 2009.

[6] W. F. Lages and E. M. Hemerly. Adaptive linearizing control of mobile robots. 1998.

[7] A. Nejati, M. Shahrokhi, and A. Mehrabani. Adaptive input-output linearization control of ph processes. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2008.

[8] H. Salarieh and M. Shahrokhi. Indirect adaptive control of discrete chaotic systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 34(4):1188 – 1201, 2007.

[9] J. Soltani, H. Zarchi, G. Markadeh, and H. W. Ping. Adaptive speed tracking control of three-phase synchronous reluctance motor taking the iron loss resistance into account. In *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, pages 625–630, Oct 2007.

[10] A. Tilli and M. Montanari. A low-noise estimator of angular speed and acceleration from shaft encoder measurement. *AUTOMATIKA-ZAGREB-*, 42(3/4):169–176, 2001.

[11] Y. Xie, D. Sun, C. Liu, H. Tse, and S. H. Cheng. A force control approach to a robot-assisted cell microinjection system. *The International Journal of Robotics Research*, 29(9):1222–1232, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

PLANIFICACIÓN DE MISIONES DE VEHÍCULOS ÁEREOS NO TRIPULADOS CON FAST MARCHING EN UN ENTORNO 3D

Verónica González Pérez
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, vegonzal@ing.uc3m.es

Concepción A. Monje
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, cmonje@ing.uc3m.es

Carlos Balaguer
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, balaguer@ing.uc3m.es

Resumen

En este artículo se plantea un método destinado a la optimización de misiones globales llevadas a cabo por un conjunto de UAVs (vehículos aéreos no tripulados) en un entorno 3D, proponiendo la adaptación futura de dicho conjunto a un sistema swarm (enjambre). Este método está basado en un algoritmo, el cual encuentra trayectorias libres de obstáculos. Se deberá tener en cuenta el escenario y los propios vehículos que componen el conjunto del swarm, minimizando así el riesgo de posibles accidentes. También se deberán considerar los distintos factores que puedan influir en la planificación de ruta, como tiempo, energía, espacio, etc., o restricciones de la aeronave, así como también el concepto multi-misión, provocando un aumento en la productividad y la eficiencia del conjunto.

Palabras Clave: UAVs, swarm, Fast Marching, misión, entorno 3D.

1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento swarm (comportamiento de enjambre) es observado en grupos de insectos u otro tipo de animales que se agrupan para conseguir un objetivo concreto. Esta conducta se basa en la agrupación y coordinación de un gran número de individuos que llevan a cabo interacciones locales, siguiendo un conjunto de reglas sencillas y actuando de forma descentralizada, obteniendo así tareas complejas y exitosas [3], [11]. Un caso donde se puede apreciar este tipo de comportamiento está en las colonias de hormigas [2]. Cada una de ellas, por sí solas son ineficaces. Sin embargo, cuando éstas son agrupadas para trabajar en grupo, siguen un conjunto de simples reglas con un control distribuido para obtener su objetivo con resultados eficaces y exitosos, como por ejemplo, la búsqueda de comida. Esta coordinación se consigue por medio de diferentes señales entre los individuos [14], en el caso de las hormigas, la organización es producida por feromonas. Sin embargo, este tipo de comportamientos no solo son observados en insectos, si no también en otro tipo de animales, como pájaros, abejas, cangrejos, etc. [2], [11]. De acuerdo con Peter Miller [11], las claves del comportamiento swarm se basan en un control descentralizado, comunicación entre los distintos individuos por medio de señales y reglas básicas.

Este comportamiento biológico, ha sido combinado con uno de los campos más prósperos y en pleno crecimiento de los últimos años, como es el área de los UAVs (vehículos aéreos no tripulados), logrando un comportamiento colectivo de estos robots. Debido al gran interés que despierta en el campo civil y militar [4], estos conjuntos se han propuesto para realizar cantidad de misiones proporcionando grandes beneficios, desde tareas de búsqueda y rescate [1], [9], [18-19] hasta asistencia al ser humano en tareas dificultosas [10], entre otras.

Esta conducta en grupo, producida por la coordinación entre un gran número de individuos, hace que las misiones llevadas a cabo de esta forma sean más exitosas que las formadas por un único elemento. Según E.Sahin [14], para conseguir un sistema multi-robot deseable se deben de cumplir las siguientes características: en dicho grupo debe de haber una cierta robustez, de esta manera, la misión no se verá afectada por inconvenientes producidos en el propio conjunto de UAVs o en el entorno; por ello debe de existir redundancia, si un individuo del conjunto lleva a cabo un error, éste debe de ser compensado por los demás individuos; por otro lado debe de haber un control descentralizado, por lo que si un elemento importante del grupo falla, este echo no debe de afectar al conjunto. La flexibilidad es otro concepto importante a tener en cuenta, ya que el conjunto de UAVs debe de saber reaccionar ante cualquier situación y ejecutar diferentes respuestas por medio de distintas estrategias de coordinación. Finalmente, el sistema debe de tener escalabilidad, el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

conjunto operará con total normalidad independientemente del tamaño del grupo.
En este trabajo se expone un método para optimizar misiones globales llevadas a cabo por un conjunto de UAVs simuladas en un entorno 3D, donde se utilizará el algoritmo Fast Marching Square [5-8]. En un futuro, también se tendrán en cuenta ciertas limitaciones operacionales como el combustible o la autonomía, entre otras, para conseguir una mayor eficiencia en la misión, así como también posibles restricciones que puedan ocasionarse debido al viento, velocidades o capacidades de maniobra de la aeronave.
En las próximas secciones se expondrá como llevar a cabo el procedimiento para conseguir el objetivo propuesto. Cabe destacar que el alcance del trabajo presentado no cubre el planteamiento del desarrollo para la adaptación del conjunto de UAVs a un sistema swarm, proponiendose este concepto para trabajos futuros. En la sección 2 se describirá el algoritmo que se implementará para la planificación de trayectorias. En la sección 3 se presentará el entorno donde se realizarán las simulaciones. En la sección 4 se explicará como adaptar e implementar el algoritmo al entorno virtual y por último, en la sección 5 se expondrá un resumen y futuros trabajos a investigar.

2 ALGORITMO A IMPLEMENTAR

A continuación se describirán los métodos Fast Marching (FM) y Fast Marching Square (FM^2) para comprender el funcionamiento de la generación de trayectorias aplicadas a cada uno de los UAVs que formarán el conjunto en la misión a efectuar.

2.1 FAST MARCHING

El algoritmo Fast Marching fue propuesto por J.Sethian en 1996 [15], el cual aproxima la solución viscosa de la ecuación de la Eikonal (1) descrita en [13] que describe como se expande una onda.

$$1=F(x)|\nabla(T(x))| \qquad (1)$$

donde x es una posición, F(x) es la velocidad de expansión de la onda en dicha posición, y T(x) es el tiempo que tarda en alcanzar la posición x. La velocidad en este caso también dependerá de si se trata de un medio homogéneo o no [6].
Como explica J.V Gómez en [7], para entender mejor el funcionamiento de este algoritmo, se pensará en un ejemplo muy simple donde se produce una expansión de una onda. Cuando se tira una piedra a un lago y ésta golpea en el medio, genera una serie de ondas consecutivas y concéntricas, las cuales se expanden siempre al mismo tiempo. Esto es debido a que se produce en un medio homogéneo; si el medio no fuese homogéneo, la velocidad de la expansión cambiaría, lo que implicaría que la onda ya no sería circular. De esta forma, si suponemos el punto donde ha caído la piedra como punto de origen, el frente de la onda tardará cierto tiempo en llegar a los demás puntos del espacio.
Por lo tanto, durante la expansión de la onda, el algoritmo calculará el tiempo que tarda el frente de onda en alcanzar los puntos del espacio, siendo el tiempo del punto donde se origina la onda T=0. La ecuación (1) se puede reescribir como se muestra en (2), siendo el gradiente de la función T(x) inversamente proporcional a la velocidad.

$$1/F(x)=|\nabla(T(x))| \qquad (2)$$

La onda presenta únicamente un mínimo global y no un mínimo local, y su frente se mueve exclusivamente por la dirección normal, siempre creciendo, por lo que, la velocidad siempre será positiva.
Para resolver la ecuación de la Eikonal para cada posición x se discretizará el gradiente T(x) de acuerdo a [13], donde x corresponde a una posición i (fila), j (columna) de un mapa mallado en un espacio bidimensional [15]. Simplificando la notación como en (3), (4), se puede reescribir la ecuación (2) obteniendo (5), cuya ecuación es resuelta en el algoritmo Fast Marching.

$$T1 = \min(T(i-1,j), T(i+1,j)) \qquad (3)$$

$$T2 = \min(T(i, j-1), T(i,j+1)) \qquad (4)$$

$$\left(\frac{T(i,j)-T1}{\Delta x}\right)^2+\left(\frac{T(i,j)-T2}{\Delta y}\right)^2=\frac{1}{F(i,j)^2} \qquad (5)$$

El algoritmo trabaja por interacciones, comenzando en el punto de la fuente de onda $T(i_0,j_0)=0$, siguiendo con los vecinos de los puntos resueltos en la anterior iteración, como se muestra en la figura 1.

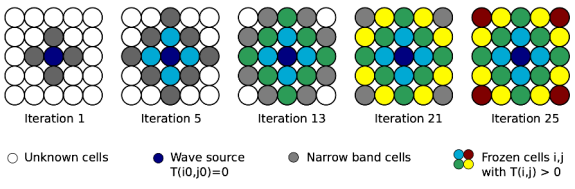


Figura 1. Propagación de una onda con el método Fast Marching [7].

2.1.1 Aplicación de Fast Marching en planificación de trayectoria

Para aplicar este método, como se explica en [7-8], se establecerá como entrada del algoritmo una imagen

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

representado el mapa donde se ejecutará la trayectoria. Esta imagen será convertida a formato binario estableciendo los espacios libres como 1 (blanco) y los obstáculos como 0 (negro). De tal forma, que la velocidad de expansión de la onda será 0 en los obstáculos, impidiendo que esta fluya a través de éstos y será constante e igual a 1 en los espacios libres. Para que el UAV tenga un margen de seguridad a la hora de pasar cerca de los obstáculos y así evitar posibles colisiones, se realiza una dilatación equivalente al radio de éste. Después, se establecerá como fuente de onda el punto final de la trayectoria, y cuando el frente de onda alcance el punto inicial este parará de expandirse. En cada píxel del mapa se almacenará un tiempo T, el cual representa el tiempo que ha tardado la onda en expandirse hasta el píxel. Finalmente, se trazará una isocurva que atravesará todos los puntos que han sido traspasados en el mismo instante de tiempo, creando la trayectoria final de la planificación. Este proceso es mostrado en la figura 2.

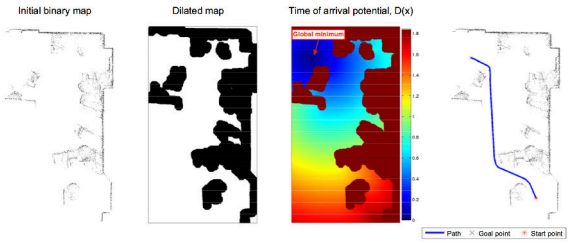


Figura 2. Pasos de la aplicación del método Fast Marching [7].

2.2 FAST MARCHING SQUARE

Como se muestra en los trabajos de Sethian [16] respecto al método FM, el resultado de la curva es óptimo de acuerdo al criterio de la mínima distancia Euclidiana, pero genera curvas demasiado cercanas a los obstáculos y con poca suavidad. El método Fast Marching Square [5] solventa todos estos problemas por medio de un mapa de velocidades, el cual modifica la expansión de onda de acuerdo a la distancia de los obstáculos cercanos.

Como se expone en [8], el algoritmo Fast Marching Square puede ser resumido de la siguiente forma: inicialmente, la entrada del algoritmo será una imagen de un mapa en cual los obstáculos asumen un valor 0 y el espacio libre un valor 1. Ahora el método FM es aplicado desde todos los puntos que representan los obstáculos, obteniéndose así el mapa de potencial mostrado en la primera imagen de la figura 3.

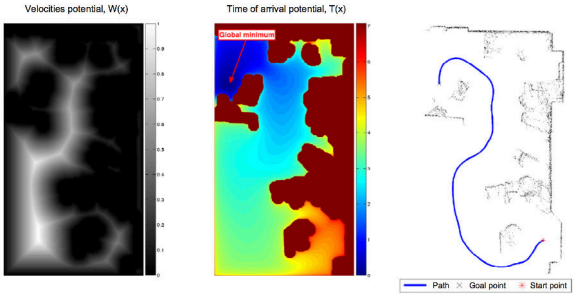


Figura 3. Pasos de la aplicación del método Fast Marching Square [7].

Este resultado es un mapa en escala de grises, en el cual el valor de cada píxel es proporcional a la distancia de los objetos cercanos, por lo que puede ser interpretado como un mapa de velocidades. Los píxeles que estén lejos de los obstáculos tendrán un valor de T mayor que los que están próximos a éstos. Si tenemos en cuenta que T es proporcional a la velocidad máxima permitida, la velocidad permitida en la trayectoria será mayor cuando el elemento esté lejos de los obstáculos que cuando esté cerca, como se demuestra en [7].

De nuevo, es aplicado el método FM en el mapa de velocidades, estipulando como punto inicial de la expansión de onda el punto final de la trayectoria, expandiéndose hasta el punto inicial. De esta forma, nuestra velocidad de expansión no será constante como en el apartado 2.2.1, si no que ahora se utilizará la velocidad obtenida del mapa de velocidades. Considerando que F(x,y) = T(x,y), donde F es la velocidad en el punto x,y y T es el valor del mapa de velocidades en x,y, se tendrá que la velocidad de expansión depende de la posición, proporcionando una trayectoria segura, asumiendo la velocidad máxima permitida.

2.1.1 Variación de saturación en FM^2

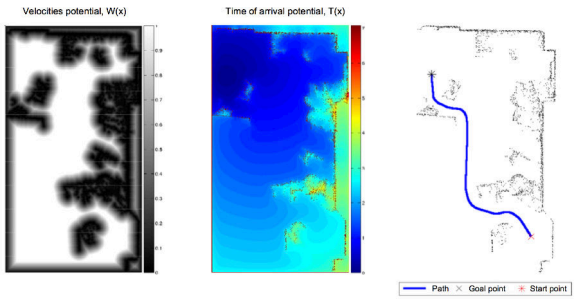


Figura 4. Modificación de la saturación a 0.3 en el mapa de velocidades [7].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

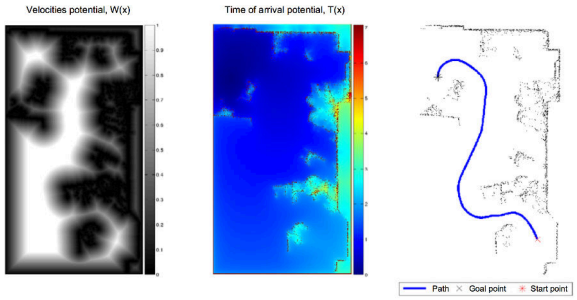


Figura 5. Modificación de la saturación a 0.6 en el mapa de velocidades [7].

En la mayoría de los casos, la trayectoria dada como resultado del algoritmo FM^2 no siempre es óptima. Los parámetros de seguridad y suavidad son muy buenos, pero no poseen un comportamiento cercano a lo humano, ya que se aleja en exceso de los obstáculos produciendo trayectorias muy extensas. Para solventar este problema, se puede realizar una variación de la saturación en el mapa de velocidades como se demuestra en [7].
Si se calcula una nueva trayectoria modificando la saturación en el mapa de velocidades, se obtiene una trayectoria más cercana a un comportamiento humano, es decir, las trayectorias generadas son más próximas a los obstáculos, creando rutas de menores distancias, como se observa en las figuras 4 y 5.

3 SIMULADOR

TSIM es un simulador, desarrollado por Tern Systems [17], destinado a la formación de controladores del tránsito aéreo. Este simulador está dotado de varias aplicaciones que permiten implementar y simular rutas de vuelo en un entorno 2D y 3D de una forma realista.
En el entorno virtual, se implementará de forma offline el algoritmo de planificación de trayectorias planteado, permitiendo visualizar los diferentes resultados de las distintas configuraciones de UAVs, sin necesidad de tener plataformas reales de alto coste.
Las planificaciones de trayectorias aportadas para la realización de la misión, serán llevadas a cabo por UAVs virtuales definidos con parámetros reales para obtener unos resultados los más próximos a la realidad. En esto también influirán diferentes elementos climáticos, como puede ser el viento afectando directamente a la operación.

3.1 ARQUITECTURA

El entorno de trabajo utilizado está formado por un servidor de bases de datos, un ordenador cliente principal y tres ordenadores clientes. El cliente principal ejecuta la simulación en 2D y lanza la aplicación encargada de visualizar los datos en 3D, que es recibida en tres ordenadores cliente. Estos últimos, para realizar la actualización de los datos mostrados, realizan consultas constantes al servidor solicitando información de las bases de datos. Así, se obtendrá una vista de 165 grados de todo el entorno virtual. Esta arquitectura se muestra en la figura 6.
El servidor de bases de datos suministra información de tres bases de datos diferentes, indispensables para llevar a cabo la simulación. Éstas tres bases de datos son:
- *Navigational database*: almacena todos los datos geográficos y de navegación.
- *Performance database*: almacena la performance de cada uno de los aviones disponibles dentro del simulador.
- *Exercise database*: almacena todos los archivos de simulación generados en el entorno.

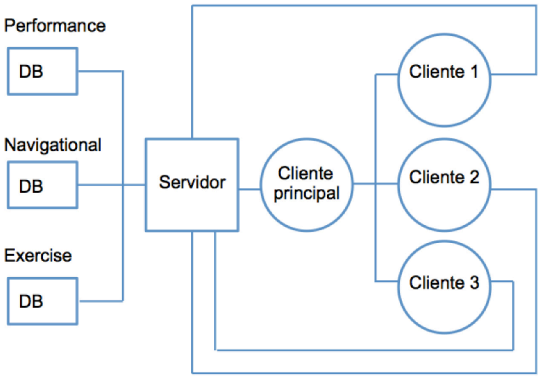


Figura 6. Arquitectura del entorno de simulación.

3.2 SOFTWARE

Como se ha comentado anteriormente, el simulador posee un entorno 2D que permite crear y gestionar todos los aviones añadidos a la simulación. También permitirá la modificación del propio entorno donde se llevará a cabo la misión.
A cada uno de los UAVs se les podrá asignar diferentes acciones de control pre-programadas en el software, simulando las acciones básicas de un avión, como aterrizar, despegar, dirigirse a un punto determinado, etc.
Los distintos parámetros asociados a cada avión son manejados desde la base de datos Performance. Estos datos son configurados para determinar un comportamiento del avión lo más asemejado posible a la realidad. Por ejemplo, si la trayectoria a realizar exige a un UAV que realice un giro con un ángulo de inclinación determinado y en su performance, este parámetro viene determinado por un ángulo de valor mayor, el UAV no lo realizará. Es decir, el comportamiento del avión es totalmente restrictivo respecto a las acciones de control dadas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En la figura 7 se muestra el mapa visualizado en el entorno 2D, donde se pueden apreciar los distintos datos geográficos cargados desde la base de datos Navigational. Desde dicha base de datos se pueden manipular e importar todos los datos geográficos que se utilizarán en el espacio aéreo del entrono virtual, imprescindibles para la navegación aérea.
Por otro lado, la figura 8 muestra un avión ejecutando un vuelo en una misión, donde son mostrados los datos de altitud, velocidad, y heading en tiempo real. De esta forma, se puede observar el comportamiento de cada uno de los UAVs que formen el conjunto y realizar modificaciones oportunas en el momento.
Las condiciones climáticas pueden ser también simuladas, un factor a tener en cuenta a la hora de implementar las trayectorias, ya que afecta directamente al comportamiento del UAV, pudiendo modificar significativamente la operación propuesta.
El simulador TSIM dispone de una aplicación para poder visualizar los archivos de simulación generados en tres dimensiones. Así, se podrán analizar con más precisión, todas las trayectorias generadas y ver más detalladamente las altitudes y distancias de seguridad entre los individuos que conformen el conjunto.

Figura 7. Mapa del entorno 2D del simulador TSIM.

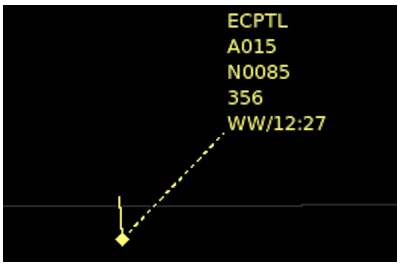


Figura 8. Avión realizando un vuelo en el entorno 2D del simulador TSIM.

Este entorno se caracteriza por su flexibilidad, ya que permite la inclusión de nuevos modelos de aviones (incluyendo UAVs), permitiendo configurar sus performances para regir el comportamiento de cada uno de ellos. Estos modelos pueden ser generados a partir de varios programas de diseño 3D, pero para que los datos 3D puedan ser incluidos en la base de datos se utilizará *OpenSceneGraph* [12], ya que esta inclusión requiere un formato asociado a este programa.
El entorno aeroportuario para el que está configurado también es modificable, permitiendo añadir nuevos entorno virtuales con diferentes configuraciones de datos geográficos.
Para constatar todo esto, se han llevado a cabo varias pruebas con dos diferentes modelos de UAVs cargados en el entorno virtual. Como objetivo se propuso que los dos individuos realizasen una trayectoria semicircular, manteniendo una velocidad y altitud relativa entre ambos, comprobando que mantienen una distancia de seguridad prudente. En este caso, no existe un líder concreto, el cual es seguido por el otro individuo. Simplemente cada uno de ellos conoce la misión que debe de realizar, es decir, hay un control descentralizado. En la figura 9 se muestran diferentes imágenes captadas a partir de las distintas etapas de la trayectoria que se ha llevado a cabo, observándose perfectamente como los dos UAVs mantienen una altitud, velocidad y distancia relativas entre ambos sin necesidad de mantener una formación líder, deformándose y volviendo a su estado inicial.

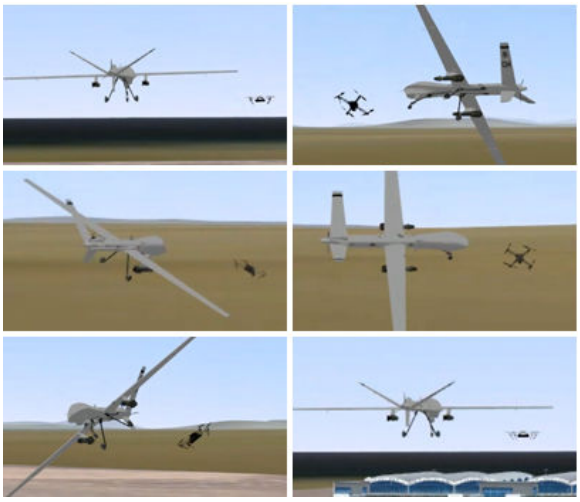


Figura 9. UAVs realizando una trayectoria en el entorno 3D del simulador TSIM.

4 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO FM^2

El algoritmo FM^2 está desarrollado en Matlab por lo que su implementación en el simulador será de forma offline.
Como objetivo inicial, se propone implementar el algoritmo con un único avión, siendo su misión principal desplazarse de un punto a otro de la manera más eficaz posible, manteniendo la distancia de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

seguridad con los obstáculos, fijando una altitud constante para inicialmente ser simulado en un entorno en 2D.
La entrada del algoritmo será el mapa de un área lo bastante grande para simular un terreno con obstáculos donde se lleve a cabo una misión concreta, en un plano bidimensional. Se tendrá también en cuenta la escala de este mapa para más adelante transportar estas medidas a dimensiones reales.
El algoritmo dará como salida una trayectoria compuesta por coordenadas cartesianas x, y. El simulador maneja distancias en coordenadas geográficas, por lo que estas posiciones deberán ser convertidas a puntos de latitud y longitud.
Otra salida del algoritmo será la velocidad que deberá de tener el individuo en cada uno de los puntos calculados de la trayectoria. Esta velocidad debe ser conforme a los datos incluidos en su performance, estipulándose una relación entre la velocidad del avión y la velocidad dada por el algoritmo. Este parámetro también será adaptado a las especificaciones expuestas para la optimización de la misión. Por ejemplo, si el conjunto de UAVs tiene que realizar dicha misión en un tiempo mínimo, la velocidad máxima de salida del algoritmo será adaptada como la velocidad máxima permitida de cada UAV. Cabe destacar que, debido a la fase temprana en la que se encuentra la investigación, todavía no se han tenido en cuenta ciertos factores reales que puedan afectar a la velocidad de la planificación, como son las alturas o zonas de vuelo y combustible de la aeronave, entre otras.
También habrá ciertas restricciones que pueden afectar a las trayectorias generadas por el algoritmo, como son el viento, las capacidades de maniobra o velocidades de la aeronave, tiempos de paso por waypoints, etc., que tampoco han sido considerados.
Para insertar la trayectoria en el simulador, será necesario un archivo de formato *.vhc* que incluya el modelo del UAV y las unidades de control con sus respectivos puntos en coordenadas geográficas, especificando también velocidad y altitud.
Una vez generado este archivo con las unidades de control configuradas, será importado al simulador y automáticamente éste entenderá y gestionará todas estas órdenes, comprobándose automáticamente los resultados.

5 RESUMEN Y FUTUROS TRABAJOS

El objetivo principal de este trabajo es realizar una misión de la manera más eficaz posible con un conjunto de UAVs, que será adaptado a un comportamiento swarm. Cada uno de los individuos tiene que adoptar un comportamiento eficiente, evitando colisiones con el entorno y con los demás aviones que forman el conjunto. Por lo que, se presenta un método para resolver los principales problemas de planificación de trayectoria en grupo, para llevar a cabo aplicaciones muy ventajosas de la forma más optimizada posible. Para conseguir la optimización buscada en la misión, habrá que profundizar y realizar estudios en factores a considerar, como por ejemplo, tiempo, combustible, espacio, etc.
La implementación del algoritmo está realizada para una formación líder, por lo que se propone como trabajo futuro la ejecución de la misión por varios UAVs y la adaptación del trabajo a un entorno tridimensional, añadiendo el parámetro de la altitud. Habrá que tener en cuenta también restricciones que pueda ocasionar la aeronave ya comentadas anteriormente, como las velocidades o capacidades de maniobra, etc., así como también el parámetro del viento, ya que todas estas limitaciones no se han considerado dentro del algoritmo.
La adaptación del algoritmo a un comportamiento swarm es otro objetivo futuro a conseguir. Otra circunstancia a tener en cuenta será la inclusión de elementos móviles en el entorno, por lo que el conjunto de UAVs tendrá que considerar estos elementos para no sufrir colisiones.
Cabe destacar que parte de la eficiencia buscada en la misión puede ser resuelta por una capacidad multi-misión, objetivo a tener en cuenta en el futuro.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el proyecto de investigación ARCADIA (DPI2010-21047-C02-01), financiado por la CICYT, y bajo el proyecto de investigación RoboCity2030-II-CM (S2009/DPI-1559), financiado por el Programa de Actividades I+D de la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

[1] Altshuler, Y., Yanovsky, V., Wagner, I. A., y Bruckstein, A. M., (2008) “Efficient Cooperative Search of Smart Targets Using UAV Swarms”, *Robotica*, vol. 26, nº 4, pp. 551-557.

[2] Bates, M., (2013) “Strength in Numbers: 5 Amazing Animal Swarms”, *National Geographic Weird & Wild*. [En línea]. Disponible en: http://newswatch.nationalgeographic.com/2013/10/16/strength-in-numbers-5-amazing-animal-swarms/

[3] Doringo, M. et al., (2013) “Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

robotic swarms", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 20, nº 4, pp. 60-71.

[4] Evers, L., Dollevoet, T., Barros, A. I., y Monsur, H., (2011) "Robust UAV Mission Planning". Erasmus School of Economics (ESE), EI 2011-07.

[5] Garrido, S., Moreno, L., Abderrahim, M., y Blanco Rojas, D., (2009) "FM2: A Real-Time Sensor-Based Feedback Controller For Mobile Robots", *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 24, nº 1, pp. 48-65.

[6] Garrido, S., Moreno, L., Gómez, J. V., y Lima, P. U., (2013) "General Path Planning Methodology for Leader-Follower Robot Formations", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, nº 64, pp. 1-10.

[7] Gómez, J. V., (2012) "Advanced Applications of the Fast Marching Square Planning Method", Tesis de Máster, Universidad Carlos III de Madrid, España.

[8] Gómez, J. V., Lumbier, A., Garrido, S., y Moreno, L., (2013) "Planning Robot Formations with Fast Marching Square including Uncertainty Conditions", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, nº 2, pp. 137-152.

[9] Hexmoor, H., McLaughlan, B., y Baker, M., (2005) "Swarm Control in Unmanned Aerial Vehicles", en *Proceedings of the 2005 International Conference on Artificial Intelligence (IC-AI)*, Las Vegas, NV, USA, vol. 2, pp. 911-917.

[10] Marjovi, A., Marques, L., y Penders, J., (2009) "Guardians Robot Swarm Exploration and Firefighter Assitance", en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, St Louis, MO, USA.

[11] Miller, P., (2007) "Swarm Theory", *National Geographic*. [En línea]. Disponible en: http://ngm.nationalgeographic.com/2007/07/swarms/miller-text/1#close-modal

[12] "OpenScenGraph Project", *OpenSceneGraph*. [En línea]. Disponible en: http://www.openscenegraph.org/

[13] Osher, S. y Sethian, J. A., (1988) "Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations", *Journal of Computational Physics*, vol. 79, nº 1, pp. 12-49.

[14] Sahin, E., (2005) "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application", en *Swarm Robotics: SAB 2004 International Workshop, Santa Monica, CA, USA, July 17, 2004, Revised Selected Papers*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 10-20.

[15] Sethian, J. A., (1996) "A fast marching level set method for monotonically advancing fronts", en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 93, nº 4, pp. 1591-1595.

[16] Sethian, J. A., (1996) *Level Set Methods And Fast Marching Methods*. Cambridge University Press.

[17] "Tern Systems", *Tern Systems*. [En línea]. Disponible en: http://www.tern.is/

[18] Varela, G., Caamaño, P., Orjales, F., Deibe, A., López-Pena, F., y Duro, R. J., (2011) "Swarm Intelligence Based Approach for Real Time UAV Team Coordination in Search Operations", en *Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, Salamanca, España, pp. 365-370.

[19] Waharte, S., Trigoni, N., y Julier, S. J., (2009) "Coordinated Search with a Swarm of UAVs", en *6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops (SECON Workshops)*, Roma, Italia, pp. 1-3.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Estudio de la robustez de los métodos de control para exoesqueletos de miembros inferiores

Ranko Zotovic Stanisic
Universitat Poliècnica de Valencia, rzotovic@isa.upv.es

Julio Hernando Vargas Riaño
Universitat Politècnica de Valencia, julio.h.vargasriano@ieee.org

Resumen

Este trabajo presenta la simulación y la comparación de tres controladores normalmente utilizados en el control de las articulaciones de exoesqueletos de miembro inferior. Se utiliza un modelo aproximado de la biomecánica de la marcha implementado en Matlab® y Simulink®. Se hace el estudio de la robustez del método de control de dinámica inversa comparado con otros métodos.

Palabras clave: Exoesqueleto, modelado, dinámica inversa, control, simulación

1. INTRODUCCIÓN

En la última década ha habido un incremento importante de las aplicaciones de la Robótica en exoesqueletos para la rehabilitación de pacientes afectados por parálisis cerebral u otras enfermedades [7], [17]. Un exoesqueleto es un robot que se puede llevar puesto por un humano. El estado de arte de los exoesqueletos se ha presentado en [2] y desde entonces no han habido otros trabajos relevantes. Los usos más comunes son: Aumento de la fuerza, velocidad y la resistencia física humana, es el caso de aplicación militar [5] y en la industria. Se le da a un humano la capacidad de aumentar su fuerza y se aprovecha la capacidad de desenvolverse en espacios no estructurados. Otros usos de interés son: la rehabilitación y la asistencia a usuarios que han perdido la capacidad de moverse debido a enfermedades o accidentes en el sistema nervioso motor [12], [9]. Los requerimientos del control deben ser precisos y coherentes con la biomecánica del cuerpo humano para no causar lesiones en tejidos blandos, articulaciones, músculos, ligamentos o huesos. En una revisión de la literatura se ha encontrado que existen pocos estudios sobre las técnicas de control de exoesqueletos [1]. Aunque el tema de los exoesqueletos en conjunto se ha documentado en varias publicaciones sobre Robótica, se abordan casos específicos sobre el control de exoesqueletos sin hacer una comparativa. Se han utilizado diferentes técnicas de control usando señales neuronales [8], señales mioeléctricas [4], [6] y control asistido por movimientos programados para rehabilitación de la marcha [16], [18]. Este trabajo se enfoca en el hecho de que para obtener una buena rehabilitación, el movimiento seguido por el exoesqueleto debería ser idéntico a la trayectoria de la extremidad de un paciente sano. Este articulo presenta un análisis comparativo de tres diferentes controladores normalmente utilizados en el control de robots [14], [13]. También se hace un análisis de la robustez del controlador con mejores prestaciones. Las conclusiones obtenidas empíricamente a través de los resultados de las simulaciones en Simulink®.

2. DINÁMICA Y MÉTODOS DE CONTROL

2.1. Modelo Dinámico

Un modelo dinámico de los miembros inferiores estudiado frecuentemente se puede encontrar en [3].

El modelo dinámico reducido se expresa en la ecuación 1.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_T \\ \ddot{\varphi}_S \\ \ddot{\varphi}_F \end{bmatrix} = A^{-1}(\varphi)\left(B(\varphi)\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_T^2 \\ \dot{\varphi}_S^2 \\ \dot{\varphi}_F^2 \end{bmatrix} + C(\varphi) + D(\varphi)\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} + E(\varphi)\begin{bmatrix} a_{HX} \\ a_{HY} \end{bmatrix} + T\begin{bmatrix} M_H \\ M_K \\ M_A \end{bmatrix}\right) \tag{1}$$

Donde φ_P,φ_T, φ_S, φ_F son los ángulos absolutos de la pelvis, el muslo, la pierna y el pie desde el eje horizontal, φ_H,φ_K, φ_A son los ángulos de las articulaciones de la cadera, la rodilla y el tobillo. Estos se muestran en la figura 1. F_x y F_y son las fuerzas de reacción horizontal y vertical, a_{HY} y a_{HX} son las aceleraciones horizontal y vertical de la cadera, COP es el centro de presión a lo largo de la suela del pie. La descripción de las matrices A, B, C, D, E y T fueron tomadas de [3] y se describen en las ecuaciones 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$A(\Phi) = \begin{bmatrix} J_{CT} + m_F L_T^2 + m_S L_T^2 + m_T d_T^2 & (m_F L_S L_T + m_S d_S L_T)\cos(\varphi_T - \varphi_S) & m_F d_F L_T \cos(\varphi_T - \varphi_F) \\ (m_F L_S L_T + m_S d_S L_T)\cos(\varphi_T - \varphi_S) & J_{CS} + m_F L_S^2 + m_S d_S^2 & m_F d_F L_S \cos(\varphi_S - \varphi_F) \\ m_F d_F L_T \cos(\varphi_T - \varphi_F) & m_F d_F L_S \cos(\varphi_S - \varphi_F) & J_{CF} + m_F d_F^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B(\Phi) = \begin{bmatrix} 0 & (m_F L_S L_T + m_S d_S L_T)\sin(\varphi_T - \varphi_S) & m_F d_F L_T \sin(\varphi_T - \varphi_F) \\ -(m_F L_S L_T + m_S d_S L_T)\sin(\varphi_S - \varphi_F) & 0 & -m_F d_F L_S \sin(\varphi_S - \varphi_F) \\ -m_F d_F L_S \sin(\varphi_T - \varphi_F) & -m_F d_F L_S \sin(\varphi_S - \varphi_F) & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C(\Phi) = \begin{bmatrix} -g(m_S L_T + m_F L_T + m_T d_T)\cos(\varphi_T) \\ -g(m_F L_S + m_S d_S)\cos(\varphi_S) \\ -g m_F d_F \cos(\varphi_F) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D(\Phi) = \begin{bmatrix} -L_T \sin(\varphi_T) & L_T \cos(\varphi_T) \\ -L_S \sin(\varphi_S) & L_S \cos(\varphi_S) \\ CF2CP_y - d_F \sin(\varphi_F) & d_F \cos(\varphi_F) - CF2CP_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$E(\Phi) = \begin{bmatrix} (m_S L_T + m_F L_T + m_T d_T)\sin(\varphi_T) & -(m_S L_T + m_F L_T + m_T d_T)\cos(\varphi_T) \\ (m_F L_S + m_S d_S)\sin(\varphi_S) & -(m_F L_S + m_S d_S)\cos(\varphi_S) \\ m_F d_F \sin(\varphi_F) & -m_F d_F \cos(\varphi_F) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

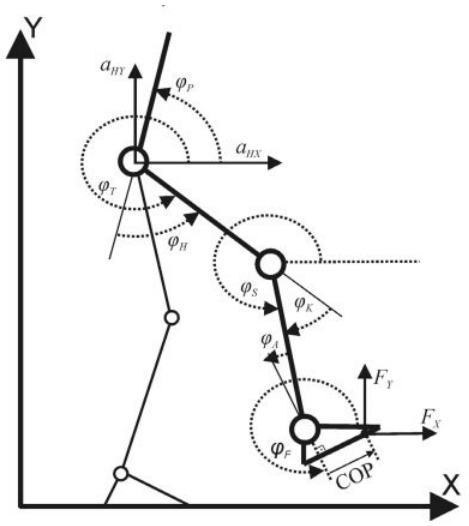


Figura 1: Diagrama de los ángulos del exoesqueleto.

La dinámica del modelo de la ecuación 1 ha sido implementada en Simulink Simulink® para Matlab® de 2010 y 2013. El diagrama de Simulink® se representa en la figura 2.

2.2. Control

En este trabajo se han implementado tres diferentes controladores: PD, PD con compensación de la gravedad y control por dinámica inversa. Las siguientes son las tres expresiones de las acciones de control para los tres casos.

- El control proporcional derivativo:

$$M = T^{-1}\left(Kp\left(\varphi_{ref} - \varphi\right) + K_V\left(\dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}\right)\right) \quad (8)$$

- Proporcional derivativo y compensación de la gravedad:

$$M = T^{-1}\left(Kp\left(\varphi_{ref} - \varphi\right) + K_V\left(\dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}\right) + \hat{C}\left(\varphi\right)\right) \quad (9)$$

- Dinámica inversa:

$$M = T^{-1}\Big(\hat{A}\left(\varphi\right)\left(\ddot{\varphi}_{ref} + K_P\left(\varphi_{ref} - \varphi\right) + K_V\left(\dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}\right)\right) - \hat{B}\left(\varphi\right)\dot{\varphi}^2 - \hat{C}\left(\varphi\right) - \hat{D}\left(\varphi\right)F - \hat{E}\left(\varphi\right)a\Big) \quad (10)$$

En las ecuaciones 9 y 10 los valores de $\hat{A}$, $\hat{B}$, $\hat{C}$, $\hat{D}$ y $\hat{E}$ son los valores estimados para las matrices A, B, C, D y E. K_P y K_V son las matrices de ganancias proporcionales y derivativas. Estas son matrices diagonales con valores positivos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

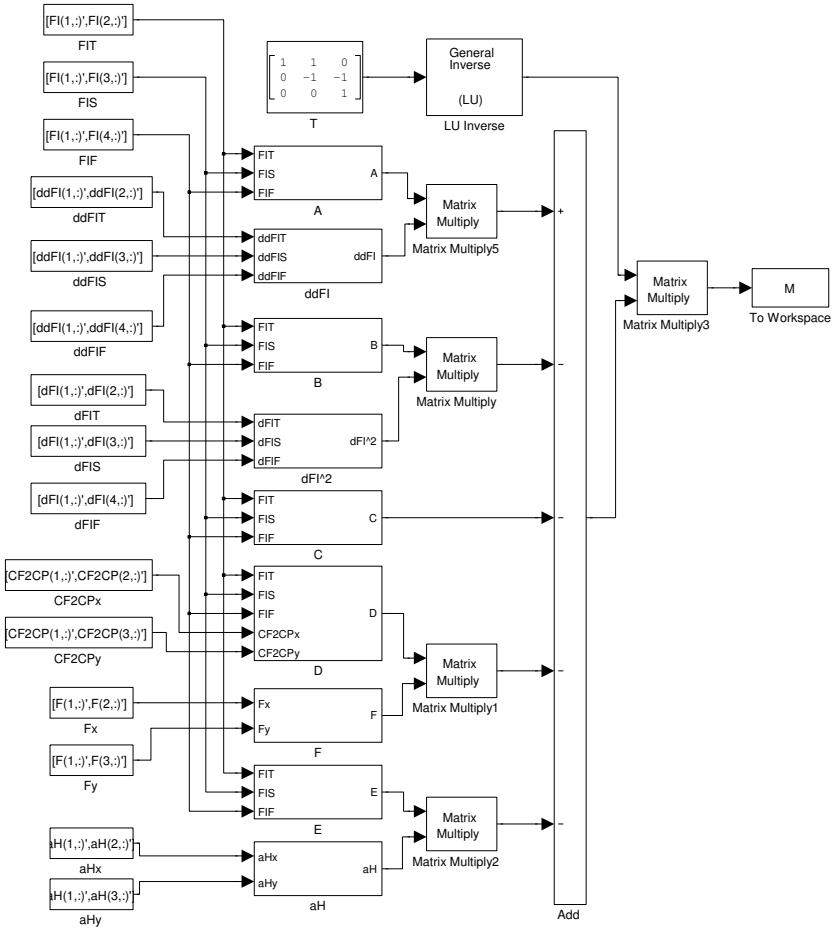


Figura 2: Modelo en Simulink® de la dinámica de la pierna.

3. SIMULACIÓN

La simulación del sistema se ha llevado a cabo primero haciendo un procesamiento previo de los datos, luego una comparativa de los diferentes controladores y finalmente realizando una prueba con la variación de los parámetros para estudiar la robustez de los controladores.

3.1. Preparación de la simulación

Las trayectorias de la marcha para la simulación fueron registrados de un sujeto sano (h: 173 cm, m: 72 kg, 26 años) en el Laboratorio de Rendimiento Humano del Centro de Interacción Sensori-Motora en Aalborg, Dinamarca. El laboratorio está equipado con un sistema optoelectrónico (8 cámaras ProReflex MCU240s, Qualisys AB, Suecia) y una placa de fuerza (OR6-5, Advanced Mechanical Technology, US). Los datos de captura del movimiento y la placa de fuerza fueron adquiridos de manera sincronizada con una frecuencia de muestreo de 200Hz usando un ordenador estándar de escritorio. Se colocaron marcadores reflexivos en los puntos de referencia de la pelvis y la pierna derecha del sujeto y grupos de marcadores rígidos se sujetaron con correas al muslo y a la pierna. El sujeto fue registrado en posición anatómica de pie erguido con las palmas adelante para la calibración [19]. Después de las pruebas de calibración, se instruyó al sujeto para que caminara normalmente en linea recta a lo largo de la pasarela del laboratorio. Solamente se tomaron en cuenta aquellas pruebas en las cuales el sujeto daba el paso en la placa de fuerza con su pie derecho. Los marcadores de las trayectorias registrados se etiquetaron y ajustaron con Qualisys Track Manager (Qualisys AB, Sweden) ay luego exportados a Visual 3D (C-Motion, US) [19], [11]. Los ángulos absolutos de los segmentos (pelvis, muslo, pierna y pie) en el plano sagital se calcularon a partir de las trayectorias de los marcadores [19] y filtrados en banda pasa

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

baja usando un filtro de Butterworth de segundo orden con cero fase con una frecuencia de corte de 6 Hz [19], [20]. La aceleración de la articulación de la cadera se obtuvo filtrando (Segundo orden, fase cero, Butterworth, 6 Hz) y diferenciando dos veces la trayectoria del marcador de la cadera. Las fuerzas de reacción vertical y horizontal y la trayectoria del centro de presión a lo largo de la suela del pie fueron calculados a partir de los datos de la placa de fuerza. Los parámetros para el modelo óseo-muscular se midieron en un sujeto sano usando las técnicas descritas en trabajos anteriores [15], [10]. Las características de los músculos fueron determinadas por la conducción de pruebas isométricas e isocinéticas usando un dinamómetro robótico (Kin-Com, Isokinetic International, US). Las características pasivas (viscosidad y rigidez) y los parámetros dinámicos (inercia, centro de masa) se obtuvieron por medio del uso de pruebas de tirar y pendulares a través de la aplicación de ecuaciones de regresión [20].

Cada segmento de la pierna tiene cuatro parámetros dinámicos: el momento de inercia, la longitud y la distancia del centro de gravedad desde el eje de rotación. Los valores de esos parámetros se muestran en la tabla 1.

Cuadro 1: Parámetros de masa, inercia, longitud, distancie desde el centro de gravedad al punto de rotación.

Parámetros dinámicos				
Segmento	***Masa*** (kg)	***Momento de Inercia*** $(kg \cdot m^2)$	***Longitud*** (m)	***Dist. centro de masa*** (m)
Muslo (T)	8.1	0.19	0.42	0.18
Pierna (S)	4.5	0.23	0.51	0.24
Pie (F)	0.7	0.08	0.08	0.035

3.2. Resultados comparativos de los controladores

Los tres controladores se ajustaron mediante la simulación. Después de varios experimentos el mejor resultado se obtuvo para las constantes proporcional y derivativas para la cadera, rodilla y pie. Estos valores e muestran en la tabla 2.

Cuadro 2: Valores de las ganancias proporcional y derivativa.

Controlador	K_{PH}	K_{PK}	K_{PF}	K_{VH}	K_{VK}	K_{VF}
PD	350	250	50	200	150	20
PD+ gravedad	200	100	50	100	50	30
Dinámica Inversa	10	5	2	5	2	1

Los resultados de la simulación de muestran en la figura 3.

Se puede apreciar que los resultados obtenidos por la dinámica inversa son los mejores de los tres. Estos tienen la trayectoria más parecida a la trayectoria de referencia.

Estas simulaciones fueron hechas asumiendo que los parámetros estimados son idénticos a los reales, sin embargo en la práctica esto no es cierto. Los parámetros de un miembro son difíciles de identificar con precisión [15]. Además estos parámetros cambian con el tiempo. Por estos motivos, se realizaron simulaciones variando los parámetros para verificar la robustez del control.

3.3. Simulaciones con variaciones de los parámetros

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones obtenidos por medio de la variación de los valores estimados de las masas, los momentos inerciales y los centros de gravedad de los segmentos. La simulación no se hizo con la longitud de los segmentos porque estos son constantes y pueden ser identificados con precisión.

3.3.1. Variación de los momentos de inercia estimados

La figura 4 representa las trayectorias de los valores para valores diferentes de los momentos de inercia estimados $\hat{J}$.

3.3.2. Variación de las masas estimadas

Los resultados obtenidos por medio de la variación de $\hat{m}$ se muestran en la figura 5.

3.3.3. Variación de las distancias del centro de gravedad desde los ejes de rotación

Cambiando los valores de las distancias estimadas $\hat{d}$ del centro de gravedad de los segmentos está representada en la figura 6.

Los resultados de las simulaciones muestran que el momento de inercia es la variable cuyo error de estimación tiene menor influencia en el error de seguimiento. El error de estimación del centro de gravedad es el que se obtuvieron peores resultados.

Para errores de estimación pequeños (20 %), el seguimiento es mejor si los valores son subestimados que cuando son sobrestimados. Sin embargo para grandes valores de error de estimación (50 %) si se subestima la masa o el centro de gravedad pueden causar oscilaciones en el sistema.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

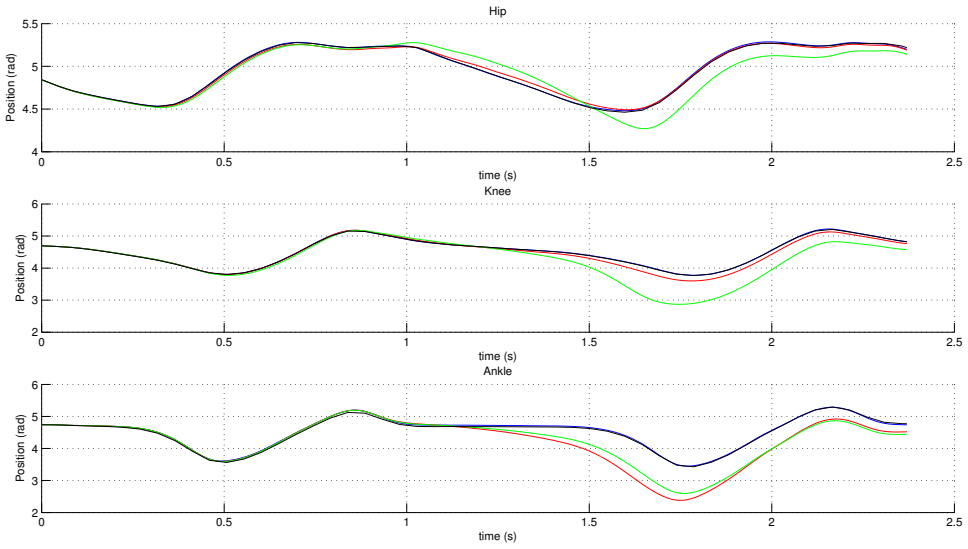


Figura 3: Gráfica comparativa, la línea azul representa el valor de referencia de la posición, la línea roja los valores del controlador PD, los valores de la línea verde los valores para PD + ggravedad y la línea roja los valores del control para el control por dinámica inversa.

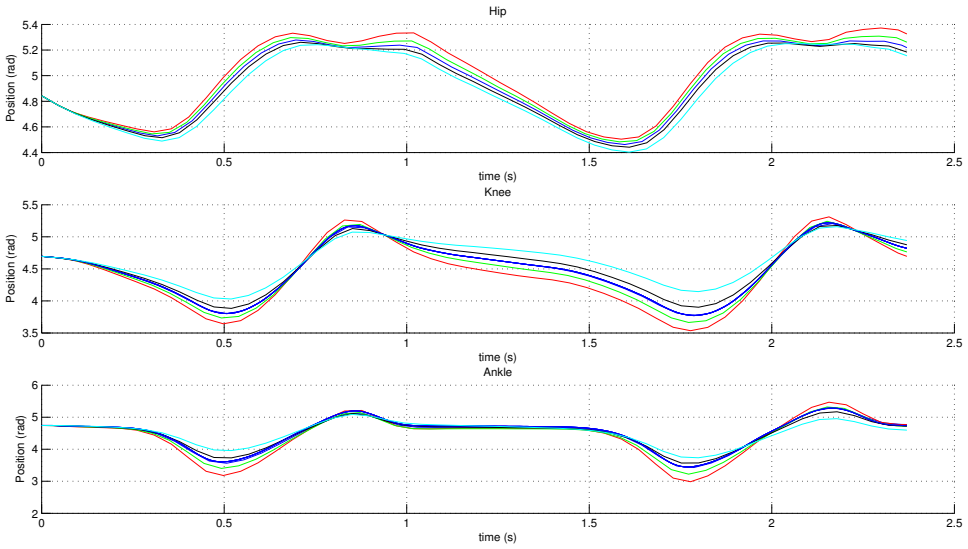


Figura 4: Efecto de la variación de los momentos de inercia en el comportamiento de los sistemas de control. La línea azul representa el valor de referencia. La linea roja se obtiene para valores de $\hat{J}$ 1,5 veces más grandes que J inicial. La línea verde 1,2 veces, la negra 0,8 y la cian 0,5.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

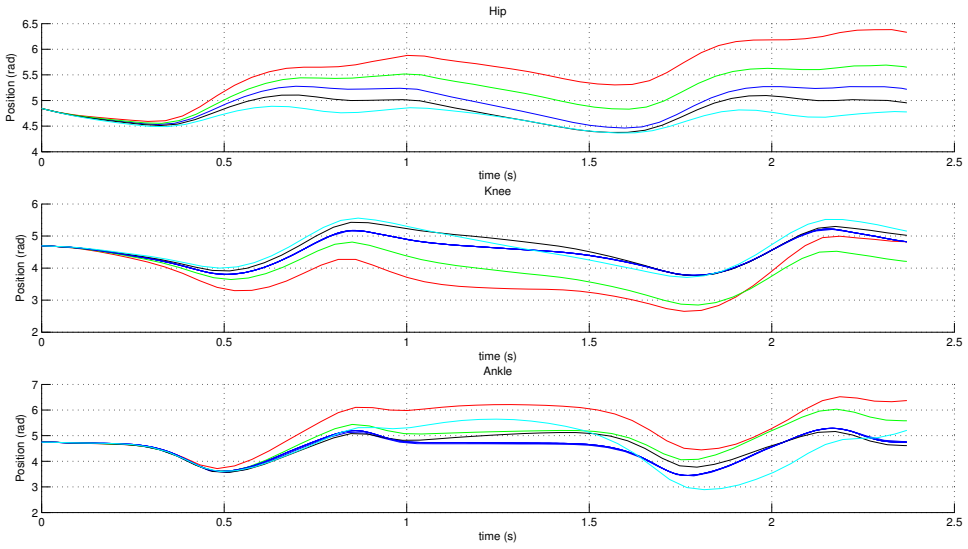


Figura 5: El efecto de la variación de la masa en el comportamiento de los sistemas. La línea azul representa el valor de referencia. La línea roja se obtiene para $\hat{m}$ 1.5 veces mas grandes que m. La línea roja 1,2 veces, la negra 0,8 y la cian 0,5.

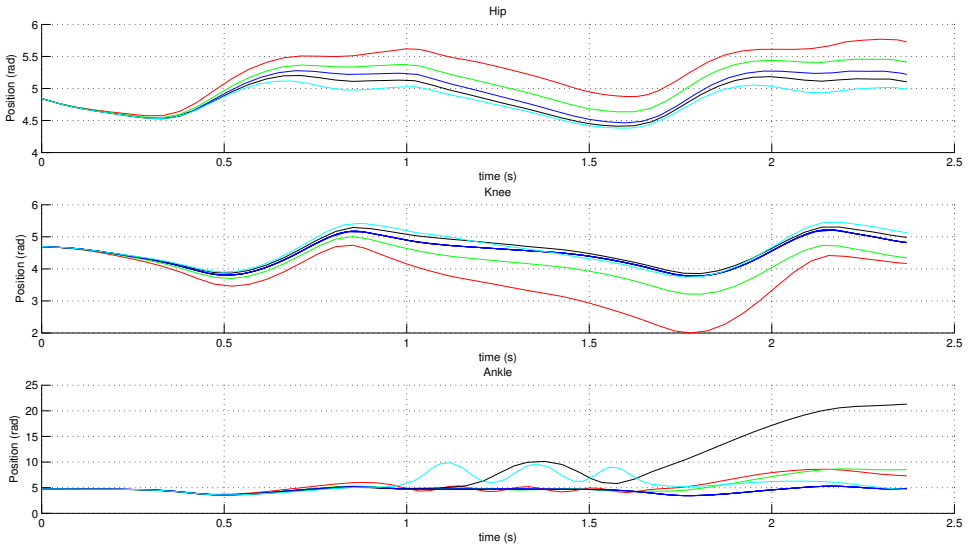


Figura 6: Efecto de la variación de la distancia del centro de gravedad en el comportamiento de los sistemas. La línea azul representa el valor de referencia. La línea roja se obtuvo para $\hat{d}$ 1.5 veces mas grande que d. La línea roja 1,2 veces, la negra 0,8, y la cian 0,5.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Se puede concluir que el error de la dinámica inversa obtiene resultados aceptables para errores de estimación pequeños (20 %). Esto podría ser mejorado incrementando las constantes proporcionales y derivativas.

4. CONCLUSIONES

En la comparación de los controladores PD, PD con compensación de gravedad y dinámica inversa, el último demuestra las mejores prestaciones.

Se ha estudiado la robustez del controlador de dinámica inversa. Se ha demostrado que para errores relativamente pequeños en los parámetros de estimación el seguimiento de la trayectoria es aceptable.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a COST Acción TD1006 - Red Europea en Robótica para Neurorrehabilitación por su apoyo en este trabajo.

Referencias

[1] Anam, K., and A. A. Al-Jumaily (2012), Active exoskeleton control systems: State of the art, *Procedia Engineering*, *41*, 988–994, doi:10.1016/j.proeng.2012.07.273.

[2] Dollar, A. M., and H. Herr (2008), Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art, *Robotics, IEEE Transactions on*, *24*(1), 144–158.

[3] Došen, S., and D. B. Popović (2013), Customized modeling and simulations for the control of FES-Assisted walking of individuals with hemiplegia, in *Introduction to Neural Engineering for Motor Rehabilitation*, edited by D. Farina, W. Jensen, and M. Akay, p. 401–420, John Wiley & Sons, Inc.

[4] Ferris, D. P., and C. L. Lewis (2009), Robotic lower limb exoskeletons using proportional myoelectric control, in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE*, p. 2119–2124, IEEE.

[5] Kazerooni, H. (2008), 33. exoskeletons for human performance augmentation.

[6] Lee, S., and Y. Sankai (2002), Power assist control for walking aid with HAL-3 based on EMG and impedance adjustment around knee joint, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002*, vol. 2, pp. 1499–1504 vol.2, doi:10.1109/IRDS.2002.1043967.

[7] Loureiro, R. C. V., W. S. Harwin, K. Nagai, and M. Johnson (2011), Advances in upper limb stroke rehabilitation: a technology push, *Medical & Biological Engineering & Computing*, *49*(10), 1103–1118, doi:10.1007/s11517-011-0797-0.

[8] Nicolelis, M. (2011), Limbs that move by thought control, *New Scientist*, *210*(2813), 26–27, doi:10.1016/S0262-4079(11)61184-6.

[9] Pons, J. L. (2008), *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*, vol. 338, Wiley Online Library.

[10] Popović, D. B., and T. Sinkjaer (2000), *Control of Movement for the Physically Disabled: Control for Rehabilitation Technology*, Springer Verlag Gmbh.

[11] Qualisys (2014), Qualisis track manager QTM – qualisys motion capture systems.

[12] Rocon, E., and J. L. Pons (2011), Introduction: Exoskeletons in rehabilitation robotics, in *Exoskeletons in Rehabilitation Robotics*, no. 69 in Springer Tracts in Advanced Robotics, pp. 1–20, Springer Berlin Heidelberg.

[13] Sciavicco, L., and L. Villani (2009), *Robotics: modelling, planning and control*, Springer.

[14] Spong, M. W., S. Hutchinson, and M. Vidyasagar (2006), *Robot modeling and control*, John Wiley & Sons New York.

[15] Stein, R. B., E. P. Zehr, M. K. Lebiedowska, D. B. PopoviC, A. Scheiner, and H. J. Chizeck (1996), Estimating mechanical parameters of leg segments in individuals with and without physical disabilities, *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, *4*(3), 201–211.

[16] Veg, A., and D. B. Popovic (2008), Walkaround: mobile balance support for therapy of walking, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, *16*(3), 264–269.

[17] Veneman, J., R. Kruidhof, E. E. G. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. F. Van Asseldonk, and H. van der Kooij (2007), Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *15*(3), 379–386, doi:10.1109/TNSRE.2007.903919.

[18] Veneman, J. F., R. Kruidhof, E. E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. Van Asseldonk, and

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

H. van der Kooij (2007), Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, *15*(3), 379–386.

[19] Visual3D (2014), Visual3d documentation.

[20] Winter, D. A. (2009), *Biomechanics and motor control of human movement*, John Wiley & Sons.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Helicopter Main Rotor Vibration Analysis with Varying Rotating Speed

Salvador Castillo-Rivera
The School of Engineering and Mathematical Sciences. The City University London. United Kingdom,
email: Salvador.Castillo-Rivera.1@city.ac.uk

M. Tomas-Rodriguez
The School of Engineering and Mathematical Sciences. The City University London. United Kingdom,
email: Maria.Tomas-Rodriguez.1@city.ac.uk

G. N. Marichal Plasencia
Departamento de Ing. de Sistemas y Automatica. La Laguna University, Spain,
email: nicomar@ull.edu.es

Abstract

In this work, different modelling aspects of helicopter dynamics are discussed. The helicopter model has Sikorsky configuration, i.e., main rotor in perpendicular combination with a tail rotor. The rotors are articulated and their blades are rigid. The implementation of the main rotor has been carried out taking into account the flap, the lag and the feather degrees of freedom for each of the equispaced blades as well as their dynamic coupling. The model has been set up by using VehicleSim, software specialized in modelling mechanical systems composed by rigid bodies. The vibrations are studied as they have a great interest in the helicopter due to the rotating behaviour of their rotors. In fact, the main cause of vibration in the fuselage comes from the main rotor. This work presents an analytical model that allows to change the main rotor angular speed. It is build up by using a proportional and derivative controller. The variation of the main rotor speed generates vibrations on the helicopter and they are analyzed on the fuselage by using short time Fourier transform processing, which allows to study the spectrums of vibrations. The results of the simulations are presented and compared to existing theory in the specialist literature.

Keywords: Vibrations, fuselage, rotor, angular, speed.

1 INTRODUCTION

In aircraft's design, vibrations have remained one of the major problems affecting helicopter development for years. In fact, the maximum speed and manoeuvring capabilities for most of the modern helicopters are limited by excessive vibration. The major source of vibration in a helicopter is the main rotor, whereas in fixed-wing aircraft, the vibrations are originated by the engines or are caused by atmospheric turbulences.

Helicopter vibration is a problem which involves complex interactions between the inertial, structural loads and aerodynamic loads.

In addition to this, vibrations affect the helicopter handling qualities, contribute to the fatigue of structural components, reduce the reliability of on-board electronic equipment, and influence the precision of on board equipment such as cameras, measure devices, etc. Vibration affects ride comfort, adds to the fatigue of pilots, crew, and passengers and also increases maintenance time and cost. The high vibration levels experienced by a helicopter could in many cases pose a limitation to the vehicle forward speed and manoeuvring capabilities [7], [10].

Vibrations are equal to the main rotor rotating frequency or multiple of that frequency. The frequency of the main rotor is a function of the angular speed at which it rotates. This is the frequency that the main rotor drives, in the fuselage [3].

The reduction of helicopter vibrations has traditionally been a difficult task to achieve. Vibrations should be analysed and study in order to identify the main frequencies and the corresponding harmonics. This information can be used to design control vibration on the helicopter if that is required and also for diagnostic purposes as the harmonics are associated with the distortion on the system [8].

The structure of the article is as follows: in sections 2 and 3, the aspects of the architecture of current helicopters are considered. Section 4 describes VehicleSim work environment, used to build the model of the helicopter. In section 5, varying rotating speed is described on the main rotor. Vibrations

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

analysis on the fuselage, as a consequence of the varying rotating speed are shown in Section 6. Section 7 contains the conclusions of the article.

2 DYNAMIC MODEL

The helicopter under study has Sikorsky configuration i.e., main rotor in perpendicular combination with a tail rotor. Both systems are set up on the fuselage. The helicopter model consists of fuselage, main rotor and tail rotor, both rotors articulated. The main rotor consists of four equally spaced blades joined to a central hub, see figure 1, and the tail rotor consists of two equally spaced blades joined to a secondary hub. The blades are rigid in both rotors. The helicopter has six degree of freedom: three translations along the (X, Y, Z) axes and three rotations around the same axes. The model presents in this paper is based in the previous works developed by the authors, (see [12], [9], [1]).

2.1 FUSELAGE

The fuselage is the rotorcraft's main body section that holds crew and passengers or cargo. Its degrees of freedom are the lateral and longitudinal translation in the horizontal plane X-Y axis, vertical translation Z axis and rotation about these same axes corresponding to yaw, pitch and roll.

2.2 MAIN ROTOR

The role of the main rotor is to support the aircraft's weight, as it generates the lift force. It allows to keep the helicopter suspended in the air the helicopter and provides the control that allows to follow a prescribed trajectory in the various spatial directions by changing altitude and executing turns. It transfers prevailingly aerodynamic forces and moments from the rotating blades to the non-rotating frame (fuselage); a conventional rotor consists of two or more identical equally spaced blades attached to a central hub. The blades are kept in uniform rotational motion (rotational speed Ω), by a shaft torque from the engine. A common design solution adopted in the development of the helicopter is to use hinges at the blades roots that allow free motion of the blade normal to and in the plane of the disk, see figure 2.
The most common of these hinges is the flapping hinge which allows the blade to flap, this is, to move in a plane containing the blade and the shaft, of the disk plane, about either the actual flap hinge or in some other cases, the flap hinge is substituted by a region of structural flexibility at the root of the blade. The flapping angle is commonly represented by β and considered to be positive for upward motion of the blade. The flapping hinge is more frequently designed to be a short distance from the centre line. This is termed an "offset" flapping hinge (eR), and it offers the designer a number of important advantages.

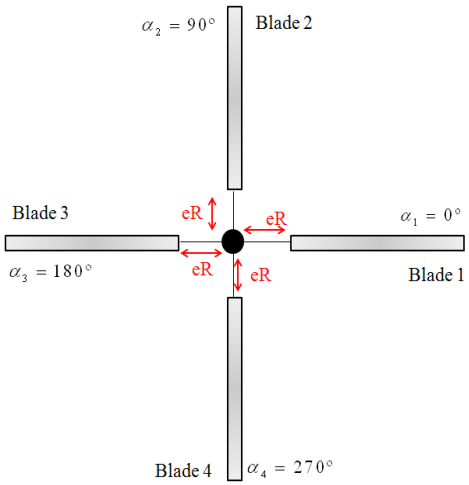


Figure 1: Main rotor configuration on nominal position

A blade which is free to flap, experiences large Coriolis moments in the plane of rotation and a further hinge (called lag) is provided to relieve these moments. This degree of freedom produces blade motion on the same plane as the disk. The lagging angle is represented by ξ and it is considered to be positive when opposite to the direction of rotation of the rotor, as produced by the blade drag forces.

A blade can also feather around an axis parallel to the blade span, see figure 2. Blade feathering motions are necessary to control the aerodynamic lift developed and, in forward motion of the helicopter, to allow the advancing blade to have a lower angle of incidence than the retreating blade and thereby to balance the lift across the craft. The feather angle θ, is considered to be positive for nose-up rotations of the blade. In order to be able to climb up, the feather angle needs to be increased. On the other hand, in order to descend, the blade's feather angle is decreased. Because all blades are acting simultaneously in this case, or collectively, this is known as collective feather and allows the rotorcraft to rise/fall vertically. Additionally to this control, for achieving forward, backward and sideways flight, a different additional change of feather is required. The feather on each individual blade is increased at the same selected point on its circular pathway. This is known as cyclic feather or cyclic control. Blade feathering control is achieved through linkage of the blade to a swashplate.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.3 TAIL ROTOR

The tail rotor of the helicopter is mounted on the perpendicular to the main rotor. It counteracts the torque and the yaw motion that the main rotor disk naturally produces. In accordance to Newton's third law of action and reaction, the fuselage tends to rotate on the opposite direction to the main rotor's blades as a reaction of the torque that appears. This torque must be counteracted and/or controlled before any type of flight is possible. Two anti-torque pedals allow the pilot to compensate for torque variance by providing a means of changing pitch (angle of attack) of the tail rotor blades. This provides heading and directional control in hover and at low airspeeds. Driven by the main rotor at a constant ratio, the tail rotor produces thrust in a horizontal plane opposite to torque reaction developed by the main rotor. Since the torque effect varies during flight when power changes are made, it is necessary to vary the thrust of the tail rotor. A significant part of the engine power is required to drive the tail rotor, especially during operations when maximum power is used. Any change in engine power output produces a change in the torque effect. Furthermore, power varies with the flight manoeuvre and results in a variable torque effect that must be continually corrected, by the tail rotor.

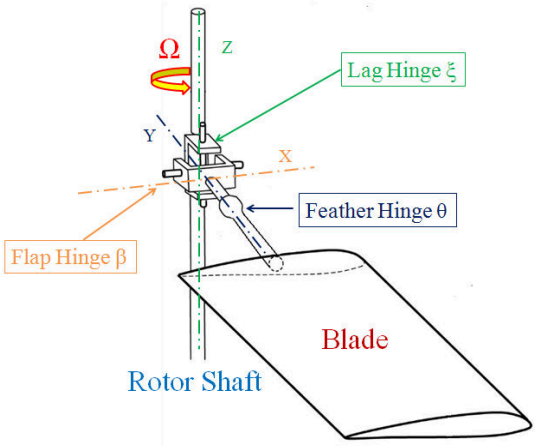


Figure 2: Schematic diagram of main rotor's hub and hinges system

3 MODELLING TOOL: VEHICLESIM

VehicleSim is multibody modelling software. The system has been used over a wide range of mechanical dynamic problems, mainly in connection to vehicle dynamics [11] and it has provided the basis for commercial simulation codes such as TruckSim, CarSim and BikeSim [6]. The syntactic rules of VehicleSim are straightforward. The output from VehicleSim can take one of several forms: (a) a rich text format file containing the symbolic equations of motion of the system described; (b) a ”C” language simulation program with appropriate data files containing parameter values and simulation run control parameters or (c) linear state space equations in a MATLAB ”M-file” format that contains symbolic state-space A, B, C, D matrices that can be used for linear analysis. Once the model has been built, it becomes independent of VehicleSim and can be executed at any time.

4 PROGRAM STRUCTURE

VehicleSim (Version 1.0, August 2008) Lisp is used to develop the multibody system code that represents the helicopter system. The multibody system is subdivided into its constituent bodies for the purpose of writing the VehicleSim code. The bodies are arranged as a parent-child relationship. The first body is the inertial frame and it has the fuselage as its only child. The fuselage is located at the origin of the inertial coordinates system and it is the parent of both the main and tail rotors. The main rotor rotates around its vertical axis, Z axis. The main rotor is the parent of the flapping hinge that rotates around the corresponding X axis, the lagging hinge is the child of the flapping hinge. The lagging hinge rotates around the Z axis. The feather hinge is the child of the lagging hinge. The feather hinge rotates around the Y axis. Finally, the blade is added to the program structure as the child of the feather hinge. The tail rotor is built up following this same parent-child structure.

4.1 MODEL DESCRIPTION

Parameters used for the simulations carried out in this work are shown in table 1, (see [12]). The values will be introduced in the model developed in VehicleSim.

Table 1: Parameter’s values

Parameters	***Symbol***	***Value***
Helicopter Mass	m_h	2064 (kg)
Blade one mass	m_{bl1}	31.06 (kg)
Blade two mass	m_{bl2}	31.26 (kg)
Blade three mass	m_{bl3}	29.96 (kg)
Blade four mass	m_{bl4}	31.16 (kg)
Spring flap hinge	k_{fj}	46772 (Nm/rad)
Spring lag hinge	k_{lj}	314938(Nm/rad)
Damping lag hinge	d_{lj}	349.58(Nms/rad)
Main Rotor Speed	Ω	44.4 (rad/s)

The action of any external forces is neglected, for example: gravity. So, the system can be considered in the vacuum. As a consequence, unbalance of mass is

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

considered on the main rotor blades in order to simulate the source of vibrations in the helicopter with the requiring amplitude to be detected in the spectrum under the action of a varying rotating speed. On the other hand, the main and the tail rotor angular speed are modelled by using PD and PID controllers respectively, in order to simulate the engine effects on each rotors.

5 VARYING ROTATING SPEED

The rotation of a helicopter rotor has certain frequency. Any vibration due to periodic motion affecting the movement of the blades within the rotor plane may have a characteristic frequency with respect to the rotor. When referred to the fuselage of the helicopter, the frequency of the vibrations may have been heterodyned by the rotor frequency and the frequencies experienced in the fuselage may then be the frequencies of the sidebands.

It is known that when two signals of frequency $\pm f_1$ and $\pm f_2$, are multiplied together, the result is that the frequencies of each must be added. These results in four frequencies, $\pm (f_1 + f_2)$ and $\pm (f_1 - f_2)$, one of them is the sum of the input frequencies and the other is the difference between them. These are called sidebands. Sidebands are found extensively in avionics, where the deliberate use of the process is called heterodyning [13].

In order to reproduce this behaviour in the helicopter model, the main rotor angular speed is implemented as varying rotating by using a PD controller. The time dependant angular velocity is defined as [2]:

$$\Omega(t) = \Omega_1 + \Omega_2 \cos(\Omega_3 t) \quad (1)$$

where Ω_1, Ω_2 and Ω_3 are angular speeds in rad/s. Equation (1) can be written as:

$$\Omega(t) = 2\pi f_1 + 2\pi f_2 \cos(2\pi f_3 t) \quad (2)$$

where f_1, f_2 and f_3 are the corresponding frequencies expressed in Hz.

In the helicopter model the main rotor angular speed is modelled by using a PD controller in order to simulate the engine effect, it can be modified taking into account equation (2), allows to simulate the varying main rotor angular speed. The linear equations of motion for the main rotor is obtained, see equation (3); it is shown for a blade with flap, lag and feather, being the result analogous for the other blades. As it can be seen, equation (3) shows the contribution of the varying angular speed on the main rotor.

The vibration spectrum in a helicopter can be described as a series of sinusoidal tones superimposed on a background of random noise. The main source of these sinusoidal tones is attributable to the harmonics appearing the main rotor. The main rotor frequency of a helicopter is relatively low (typically 3-8 Hz) and inaccuracies in the rotor track, balance or blade pitch will result in sinusoidal tones at this frequency [5].

$$\begin{aligned}&\dot{\Omega}[I_{rtz} + I_{blz}cos^2\theta + I_{blx}sin^2\theta \\ &+m_{bl}\left(y_{bl}^2 + eR\left(eR + 2y_{bl}\right)\right) - k_d] \\ &= k_d\left(39.48 f_1 f_2 sin\left(2\pi f_3 t\right)\right) \\ &-k_p\left(2\pi\left(f_1 + f_2 cos\left(2\pi f_3 t\right)\right) - \Omega\right) \\ &-\left(2I_{blx} - 2I_{blz}\right)\Omega\dot{\theta}cos\theta sin\theta\end{aligned} \quad (3)$$

where k_p and k_d are the proportional and derivative controller gains. θ is the feather angle. I_{rtz} is the main rotor moment of inertial around the Z axis. I_{blx} and I_{blz} are the blades moment of inertia around the X and Z axes, and y_{bl} is the centre of mass of the blade along the Y axis.

Several combinations of frequencies can considered in order to detect vibrations on the fuselage. In this work, f_1=7 Hz according to the standard main rotor angular speed for this helicopter model, (see table 1). On the other hand, the frequency f_3 will take the values: $f_3=f_1$ and $f_3=f_1/2$, these cases are of special interest because the fuselage is sensitive to vibrations from the main rotor at frequencies equal or multiple of this frequency.

On the other hand, f_2 will be changed in order to regulate the amplitude of the varying main rotor angular speed, (see figures 3 and 4). So an additional perturbation will be taken into account in order to study its effect on the system. As a consequence of this, f_2=0.16 Hz or (1 rad/s), and f_2=0.40 Hz or (2.5 rad/s), these values are chosen as small varying rotating speed (1 rad/s) and high varying rotating speed (2.5 rad/s), other values can be taken in to account but these are given as examples allowing to illustrate the behaviour under study.

Figure 3 shows the varying main rotor angular speeds when $f_3=f_1/2$=3.5 Hz, f_2=0.16 Hz and f_2=0.40 Hz, the curves are obtained for cyclic feather angle with 0.1 rad or 5.72º. In this work, all the simulations are carried out with these cyclic values. In addition to this, an interval of time of 1 second is shown in order to see the behaviour clearly, although the simulation is carried out for 44 seconds. In figure 4, the varying main rotor angular speeds take the values:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

f_3=f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_2=0.40 Hz; the previous comments for figure 3 also apply to this figure.

Typically, the main rotor frequency is detected on the fuselage as the main source of vibration, see [9]. The varying angular speed should generate additional spectral components on the fuselage, see equation (3). The combinations of frequencies (heterodyning) should be detected on the fuselage in the form of vibration (Watkinson [13]). On the other hand, harmonics should also appear when additional distortions are considered i.e., the varying rotating speed raises its amplitude, (see discontinuous lines in figures 3 and 4).

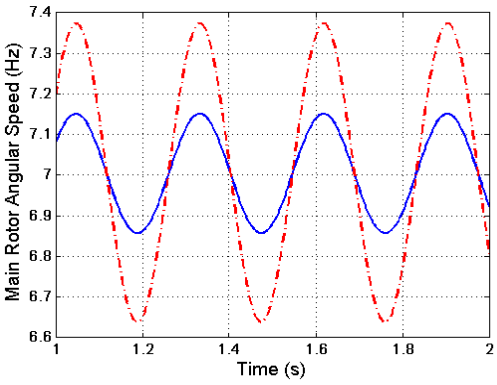


Figure 3: Varying main rotor angular speed vs. time. Solid blue line represents: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz. Dotted red line, f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz

6 VIBRATIONS AND ANALYSIS

The analysis of the vibration modes on a helicopter is a difficult task due to the complexity of the structure, but reasonable accuracy is achievable with modern techniques.

There is a further consequence of the use of a rotating frame of reference that affects vibration frequencies created in the rotor and transmitted to the fuselage. The frequencies generated in the rotor may contain the rotational frequency of the rotor and the external frequency as a perturbation; both added and subtracted [13].

This work is carried out by estimating the vibration under the excitation conditions described previously. In order to carry out the proposed analysis it is necessary to follow the next procedures: a) detection of vibration signals on the fuselage as a consequence of varying rotating speed on the main rotor and b) harmonic separation on the basis of the spectrogram identification of the detected vibration signals.

In order to analyze the vibrations signal on the fuselage, short time Fourier transform is used (STFT). In mathematical terms, the STFT is defined as:

$$S_x(t,\omega)= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\, h(\tau - t)\, e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

$x(t)$ is the corresponding signal under study, and $h(t)$ is a finite support window function. The properties of the window function $h(t)$ have a significant effect on the STFT display and should be carefully chosen.

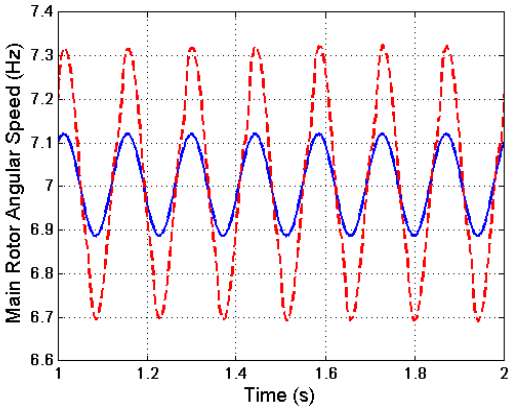


Figure 4: Varying main rotor angular speed vs. time. Solid blue line represents: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1. Dotted red line, f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1

6.1 HETERODYNING

If the main rotor angular speed is varying and the main rotor has unbalance of mass, as mentioned before, the fuselage may sense these effects in the form of vibrations. In order to analyse the pure frequencies from the main rotor, the tail rotor angular speed degree of freedom is deactivated as the simulation allows to do so. The vibrations detected on the fuselage will appear from the main rotor only, in the form of addition, the vibrations on the fuselage will be analyzed in the roll and pitch axes.

According to Watkinson [13], if the main rotor angular speed is changing and it is composed by two signals of different frequencies, as a result the frequencies of each one must be added. A first simulation is carried out with a combination of frequencies: f_3=f_1/2=3.5 Hz and f_2=0.16 Hz or 1 rad/s, in this case f_3 is half of f_1, (see figure 3). The result of this simulation is shown in the fuselage spectrogram around the X axis (roll), it is obtained by using (STFT), see figure 5. As it can be seen, there are three main frequencies: 3.5 Hz= f_1 - f_3, 7 Hz= f_1 and 10.5 Hz= f_1 + f_3. This spectrogram shows clearly a heterodyning behaviour.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

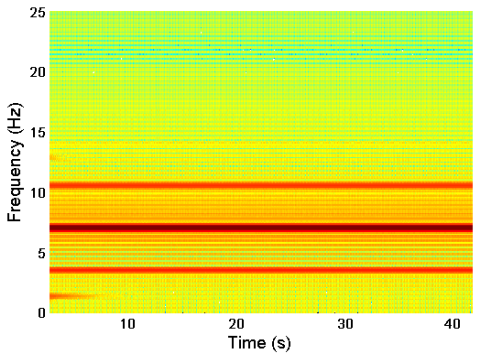


Figure 5: Fuselage X axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz

If the spectrogram is obtained for the fuselage around the Y axis (pitch) the heterodyning behaviour is also shown, see figure 6.

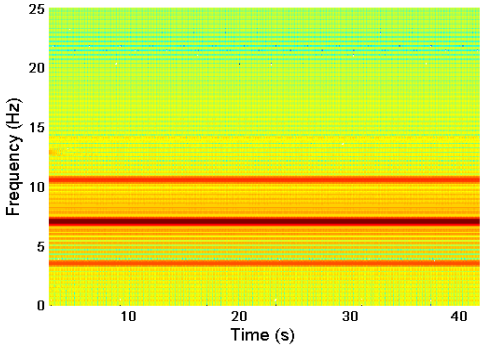


Figure 6: Fuselage Y axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz

A second combination of frequencies can be studied, in this case, f_3=f_1=7 Hz and f_2=0.16 Hz or 1 rad/s, here f_3 is equal to f_1. The spectrogram of the fuselage around the X axis is shown in figure 7. As it can be seen, there are two main frequencies: 7 Hz =f_1 and 14 Hz= f_1 + f_3, heterodyning behaviour is verified on the fuselage as a consequence of the varying angular speed. The spectrogram for the fuselage around the Y axis is represented in figure 8: two main frequencies are clearly identified, their values are 7 Hz and 14 Hz, this coincides with the expected behaviour.

The variation on time dependence in the rotor angular speed results in vibrations that affect the fuselage roll and pitch, and their sidebands are as expected.

6.2 HETERODYNING AND INCREASE IN VARYING ROTATION SPEED

The identification of existing sidebands is a strong indicator of failures in mechanical systems. The presence of harmonic or modulation series is then used as indicators of distortion or damage of one or more mechanical parts of the system. Mathematically, a harmonic series is characterized by a fundamental frequency and defined as a set of spectral components of frequencies representing the harmonic order [4]. The next study will allow to test the presence and absence of harmonics as a consequence of the increase in the varying main rotor angular speed, being it a useful tool to detect anomalous behaviour. The harmonics may be generated as a consequence of an increase of f_2 in each case, which generates vibration excitations. f_2 is increased from 0.16 Hz or 1 rad/s to 0.40 Hz or 2.5 rad/s.

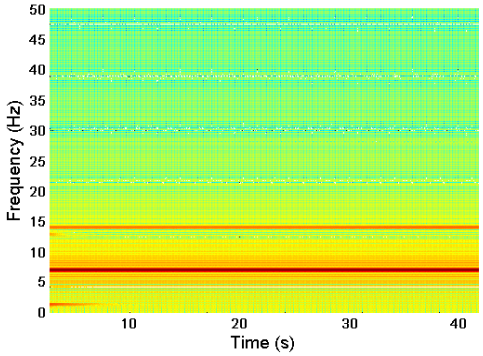


Figure 7: Fuselage X axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1=7 Hz

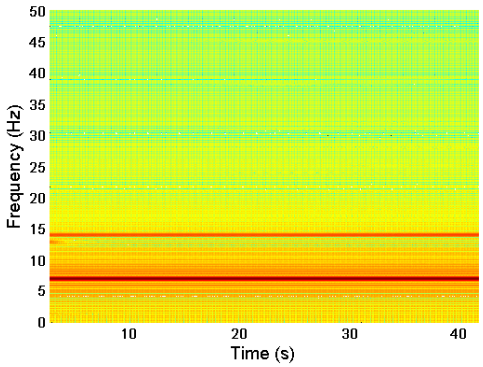


Figure 8: Fuselage Y axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.16 Hz and f_3=f_1=7 Hz.

Take f_3=f_1/2=3.5 Hz and f_2=0.40 Hz or 2.5 rad/s, the varying main rotor angular speed changes as figure 3 shows. The corresponding spectrogram of the fuselage around the X axis is represented in figure 9.

A comparison can be done between figures 5 and figure 9, as it can be seen the frequencies 3.5 Hz, 7 Hz and 10.5 Hz are presented in the spectrogram, and harmonics appear with frequencies 14 Hz= f_1+2f_3, 17.5 Hz= f_1+3f_3 as a consequence increase in f_2.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

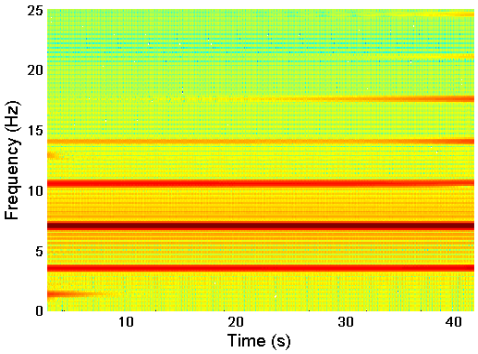


Figure 9: Fuselage X axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz.

Similar study can be carried out with the fuselage pitch axis, being the behaviour analogous to the fuselage roll axis, (see figure 10):

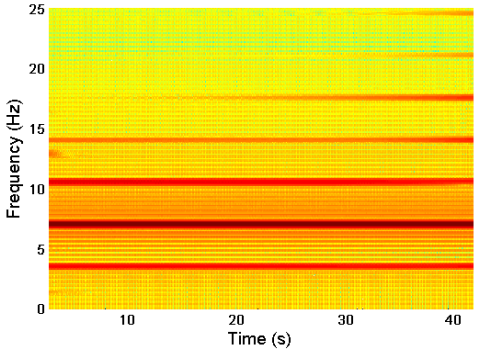


Figure 10: Fuselage Y axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1/2=3.5 Hz.

A final simulation is carried out with the combination of frequencies: f_3=f_1=7 Hz and f_2=0.40 Hz or 2.5 rad/s. The spectrogram of the fuselage around the roll axis is represented in figure 11. A comparison can be done between figure 7 and figure 11, the frequencies 7 Hz and 14 Hz appear in the spectrogram, and harmonics appear with frequencies 21 Hz= f_1+2f_3, 28 Hz= f_1+3f_3, 42 Hz= f_1+5f_3.

Similarly, a spectrogram is obtained for the fuselage pitch axis. As it can be seen in figure 12, the spectrogram shows the same sequences of harmonics that the fuselage X axis for this combination of frequencies.

The basis of this analysis is to study the effects on the fuselage spectrogram (X and Y axes) of the increase in f_2. The changes introduced in rotor angular speed have an impact in the fuselage in the form of vibrations and subsequent harmonics that appear as expected from theoretical predictions, as proposed by Keysan [8].

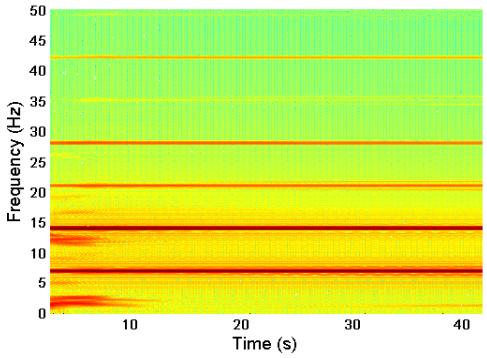


Figure 11: Fuselage X axis spectrogram when the varying main rotor is speed given by: f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1=7 Hz

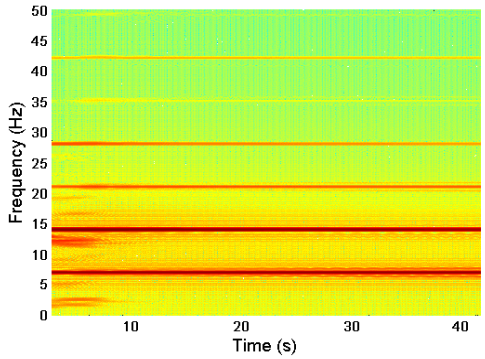


Figure 12: Fuselage Y axis spectrogram when the varying main rotor speed is given by: f_1=7 Hz, f_2=0.40 Hz and f_3=f_1=7 Hz

The main vibration excitations on a helicopter are mechanical and aerodynamical excitations. These results allow to establish analogies between the varying rotating speed of the rotor and experimental behaviour such as dynamic, aerodynamic loads, inconstant air velocity... Experimental spectrograms will be studied and analogies can be established with the results purpose in this work.

7 CONCLUSIONS

This work has presented a model in which the main rotor angular speed is not constant and changes by means of a PD controller. This allows to obtain different combinations of frequencies between the main rotor standard frequency and external varying frequencies, this combination of frequencies are important in order to study and analyze the vibrations appearing in the fuselage as a consequence of these perturbations. Various tests in absence of external perturbations were carried out in order to study pure

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

vibrations on the fuselage roll and pitch axes under the action of this varying rotating speed.

The helicopter model under study is on Sikorsky configuration, the model reproduces the dynamic behaviour of a helicopter, which is capable to transmit perturbations from the main rotor to the fuselage in form of vibrations. The model has been implemented in VehicleSim, a program allows to define the systems as composition of several bodies and ligatures by using a parental relationship parent/child structure.

Vibrations spectrogram of the fuselage have been obtained and analyzed by using short time Fourier transform process. Heterodyning conditions were found in the spectrograms for the various cases analyzed, i.e., when the frequency f_3 changes its value as $f_3=f_1$ and $f_3=f_1/2$, the obtained results match those predicted by theoretical approaches. On the other hand, sequences of harmonics on the spectrograms were observed when the main rotor varying angular speed increases the frequency f_2. These results are still on preliminary phase and the authors expect that they will allow to develop further analogies with experimental results in future work.

In summary, a full helicopter model has been modelled using VehicleSim. Spectrograms analysis on the fuselage roll and pitch axes reflected appearing vibrations as a consequence of the varying nature of the main rotor angular speed, these results have been shown to satisfy theoretical predictions.

Acknowledgements

This work has been supported by the Spanish Government project DPI2010-20751-C02-02 of Ministerio de Ciencia e Innovación and by the grant of the Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información del Gobierno de Canarias, cofinanced with the European Social fund.

References

[1] Castillo-Rivera, S., Tomas-Rodriguez, M., Marichal, G.,N., López, A (2013) "Estudio de la interacción del fuselaje y el movimiento de aleteo de las palas del rotor principal en un helicóptero". XXXIV Jornadas de Automatica. pp. 514-521. ISBN 978-84-616-5063-7.

[2] Chen, Y., Yao, M., Zhang, W (2011) "Nonlinear Vibrations of the Blade with Varying Rotating Speed". IEEE. 978-1-4244-9439-2/11

[3] Ferrer, R., Krysinski, T., Aubourg, P., Bellizi, S. (2001) "New Methods for Rotor Tracking and Balance Tuning and Defect Detection Applied to Eurocopter Products American Helicopter Society" 57th Annual Forum, Washington, DC, May 9-11.

[4] Gerber, T., Martin, N., Mailhes, C (2013) "Identification of Harmonics and Sidebands in a Finite Set of Spectral Components". The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (CM & MFPT), Cracovie, Poland.

[5] Halfpenny, A., Walton, T (2010) New Techniques for Vibration Qualification of Vibrating Equipment on Aircraft. Aircraft Airworthiness & Sustainment

[6] http://www.carsim.com/products/supporting/vehiclesim/index.php

[7] Johnson, W (1908) Helicopter Theory. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press.

[8] Keysan, O., Ertan, H. Higher Order Rotor Slot Harmonics for Rotor Speed & Position Estimation. 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM. 978-1-4244-7040-4

[9] Marichal, G.,N., Tomas-Rodriguez, M., Lopez, A., Castillo-Rivera, S., Campoy, P (2012) "Vibration Reduction for Vision System on Board UAV using a neuro-fuzzy Controller". Journal of Vibration and Control. DOI 10.1177/1077546313479632.

[10] Nguyen K. (1994) "High Harmonic Control Analysis for Vibration Reduction of Helicopter Rotor Systems". NASA Technical Memorandum 103855.

[11] Sharp, R, S., Evangelou, S., Limebeer, D,J,N. (2005) Multibody aspects of motorcycle modeling with special reference to Autosim, Advances in Computational Multibody Systems, J. G. Ambrosio (Ed.), Springer-Verlag, Dordrecht, The Netherlands, 45-68.

[12] Tomas-Rodriguez M., Sharp R. (2007) "Automated Modeling of Rotorcraft Dynamics with Special Reference to Autosim". Automation Science and Engineering. CASE 2007. IEEE International Conference, pp: 974-979.

[13] Watkinson. J (2004) The art of the helicopter. Elsevier Butterworth-Heinemann.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CLASIFICACIÓN DE CAMBIOS DE DIRECCIÓN DURANTE LA MARCHA MEDIANTE EL USO DE SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS

Juan F. Abril, Daniel Planelles, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez y José M. Azorín
Universidad Miguel Hernández de Elche,
Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante)
juan.abril@goumh.es

Resumen

En este artículo se presenta la construcción de un modelo predictivo basado en señales electroencefalográficas para la detección anticipada de cambios voluntarios en la dirección durante la marcha, distinguiéndose dos estados, cambio de dirección a izquierdas y a derechas. Se han realizado pruebas sobre 4 usuarios sin haber realizado un entrenamiento previo, obteniendo una tasa de acierto de hasta el 90%, lo que indica que puede considerarse como una buena base para su uso en Interfaces Cerebro-Computador.

Palabras Clave: ICC, EEG, ERD, Cambio Dirección, Máquina de Vector Soporte

1 INTRODUCCIÓN

La idea de controlar máquinas, no por control manual sino gracias al mero pensamiento, ha fascinado a la humanidad desde siempre, y los investigadores que están trabajando en los campos de la ciencias informáticas, neurociencia e ingeniería biomédica han empezado a desarrollar los primeros prototipos de Interfaces Cerebro Computador (ICCs) a lo largo de la última década [2], [9].

Este artículo se centra especialmente en la detección de ciertos mecanismos cognitivos que se producen durante la marcha y su utilización como señales de control en interfaces cerebro-computador. Este trabajo forma parte del proyecto BioMot - Smart Wereable Robots With Bioinspired Sensory-Motor Skills (realizado gracias al acuerdo de subvención nº IFP7-ICT-2013-10-611695) que busca, a grandes rasgos, ser capaz de mitigar las complicaciones derivadas de desórdenes de movimiento o parálisis en pacientes mediante el uso de un exoesqueleto fijado en el tronco inferior y controlado directamente por el paciente a través de sus señales electroencefalográficas (EEG).

Por lo tanto, se explorará la posibilidad de utilizar las señales EEG para detectar el intento voluntario por parte del usuario de realizar un cambio de dirección durante la marcha antes de que este ocurra, así como su sentido.

El uso de señales EEG es un método apropiado para capturar intentos de movimiento. Su naturaleza no invasiva es más atractiva para los usuarios y posee una alta resolución temporal, de la cual carecen otros métodos no-invasivos, como la resonancia magnética funcional. Los sistemas EEG son, del mismo modo, baratos comparados con otras tecnologías y pueden ser utilizados cómodamente por el sujeto incluso en periodos largos de tiempo. Hay algunos grupos interesados en producir electrodos secos o en incluir tecnología inalámbrica para su conexión con teléfonos móviles [8]. Otros grupos han logrado analizar la actividad cerebral producida durante un intento de inicio de marcha y determinar de este modo las regiones del cerebro involucradas, así como caracterizar la señal EEG durante el proceso [6], [10].

Una ICC basada en EEG utiliza determinadas características presentes en la señal bioeléctrica capturada de la corteza cerebral, la procesa y la emplea como señal de control. Estas características pueden pertenecer al dominio del tiempo [7] o al de la frecuencia [3]. Procesando estas características, el algoritmo de la ICC obtiene información de cualidades específicas del estado actual de la señal EEG de un sujeto en diversos dominios, y las transforma en órdenes que pueden ser utilizadas como entrada a un dispositivo que ejecuta una tarea práctica concreta. En el asunto que compete a este artículo, este algoritmo debe ser capaz de encontrar patrones de actividad cortical que reflejen la intención del usuario y que se adecuen a las restricciones de la aplicación [1].

Para el procesamiento de la señal EEG nos basaremos en la variación de los ritmos sensori-motores al realizar un movimiento, que se manifiesta con una desincronización relacionada a un evento (ERD: Event Related Desynchronization). Esta se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

define como una caída de potencia anterior al inicio del movimiento en la banda mu y beta. Tras realizar el movimiento, se produce una sincronización relacionada al evento (ERS: Event Related Synchronization), el cual se caracteriza como un incremento de la potencia al final del movimiento en la mismas bandas de frecuencias [14]. Se espera que las regiones del cerebro afectadas sean el lóbulo frontal y parietal, concretamente en el homúnculo, situado justo en el corte transversal del cráneo a la mitad del mismo. La desincronización es independiente de la duración del movimiento y su amplitud puede verse incrementada durante el aprendizaje de tareas motoras complejas o con la imaginación del movimiento previa a su realización. Es posible interpretar este fenómeno como el reflejo de la actividad conjunta de determinadas áreas corticales involucradas en la generación de un movimiento voluntario [12].

Las características presentadas por el fenómeno ERD solo serán evidentes tras promediar un gran número de ensayos sobre un sujeto [4]. Con un solo ensayo, la relevancia de tales características es muy pobre comparada con la actividad mental subyacente en la señal. Para mejorar esta relevancia y con ello la relación señal-ruido, se han realizado múltiples trabajos donde se analizan técnicas de procesamiento de señal y reconocimiento de patrones [16] que ayuden a construir clasificadores precisos. En el caso que aquí se presenta, el procesamiento empleado ha sido un filtrado frecuencial, cuya finalidad es eliminar potenciales corticales lentos y potenciales galvánicos de la piel, así como un filtrado espacial, que nos eliminará el ruido ocasionado por la contribución de los electrodos vecinos.

Con todo ello, el objetivo de este estudio es detectar la actividad cortical basada en EEG que está relacionada con cambios de dirección voluntarios durante el proceso de marcha. Según nuestro conocimiento, este es el primer trabajo en intentar clasificar la intención de cambio de dirección empleando las señales EEG obtenidas antes del inicio del cambio. El sujeto camina en un entorno real desde una posición cualquiera de inicio cuando segundos después, de forma voluntaria, cambia su dirección de la marcha, tanto a izquierda como a derecha, buscando de esta forma clasificar dos estados diferenciados, como son el giro a derecha y el giro a izquierda.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 REGISTRO DE DATOS

Cuatro sujetos sanos de entre 22 y 29 años (25,5±3,5), todos hombres diestros, han participado en el experimento. Todos los sujetos han leído y firmado el correspondiente formulario de consentimiento. Los sujetos no estaban entrenados en la tarea a realizar y no se les dio información que pudiese condicionarlos a modular sus señales corticales para producir mejores resultados.

La recopilación de datos proviene de dos fuentes diferenciadas. Por un lado se han recogido las señales continuas de EEG utilizando 32 electrodos colocados sobre un gorro (g.GAMMAcap, g.Tec, Austria). En la figura 1 se puede apreciar cual ha sido la configuración de electrodos que se ha utilizado según el sistema Internacional 10/10.

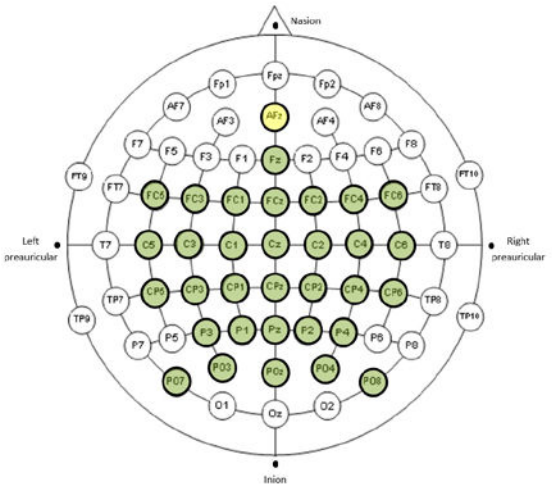


Figura 1: Configuración de electrodos. Los electrodos usados están sombreados. El electrodo AFz es el de tierra.

La tierra se ha situado en la posición AFz y la referencia en el lóbulo de la oreja derecha.

Para registrar las señales se han utilizado dos amplificadores comerciales (g.USBamp, g.Tec, Austria), configurados respectivamente como maestro-esclavo para poder albergar todos los electrodos. La frecuencia de muestreo de la señal es de 1200 Hz, aplicándosele además un filtro interno de 0.1 a 100 Hz y un filtro Notch de 50 Hz para eliminar las perturbaciones eléctricas. Tras ello las señales son procesadas y clasificadas.

Por otro lado, se ha empleado un conjunto de unidades de medición inercial (IMU: Inertial Measurement Unit) (Technaid S.L, España). El esquema de conexión se puede apreciar en la Figura 2, distribuyéndose a lo largo de todo el tren inferior 7 IMUs.

Estos sensores han proporcionado información referente a la matriz de rotación, aceleración, velocidad angular, campo magnético y temperatura, permitiéndonos obtener toda la información del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

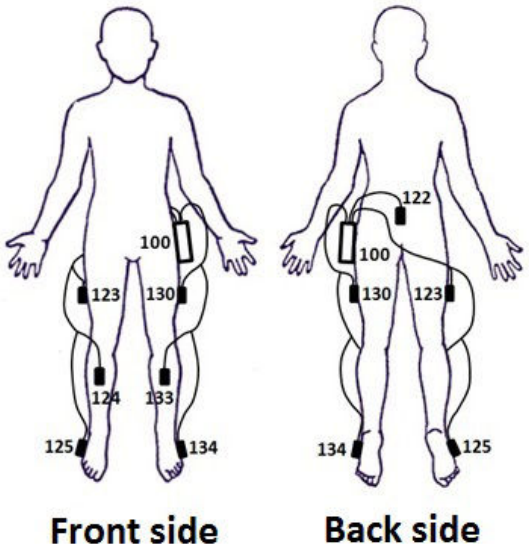


Figura 2: Esquema de conexión IMUs. 100: Tech Hub; Sensores inerciales en ambas piernas situados en el lateral del muslo y el pie, además de sobre la tibia.

estado de la marcha del sujeto, y por lo tanto, los instantes en los que se producía un cambio en la dirección de la marcha. Su frecuencia de muestreo ha sido de 30 Hz.

Los experimentos han consistido en 2 sesiones diferenciadas para cada sujeto, realizadas en diferentes días. Cada una de estas sesiones estaba constituida por 8 pruebas de 10 repeticiones cada una. Como resultado, hemos recopilado 160 muestras de intención de cambio de movimiento para cada uno de los 4 sujetos. El número de giros a izquierda y a derecha no está previamente definido, por lo que dependerá de la voluntad del usuario.

Los sujetos disponían de una amplia sala donde realizar las pruebas. Una vez se les indicaba el comienzo de una nueva repetición, el sujeto era el encargado de decidir voluntariamente cuándo daba comienzo a la marcha. Tras aproximadamente 5-7 segundos caminando en la misma dirección, el sujeto cambiaba voluntariamente el sentido de la marcha realizando un giro de aproximadamente 45º y continuando la marcha con normalidad.

Para poder disponer de todo el equipo en movimiento, era necesaria la colaboración de una persona encargada de acompañar al sujeto con un carro de seguimiento que portaba todo el equipo necesario manteniéndose siempre fuera del campo visual del sujeto durante el desarrollo de la prueba. En la Figura 3 podemos observar una imagen tomada a uno de los sujetos junto a la disposición del equipo durante la prueba.

Figura 3: Disposición del equipo durante la prueba. Sobre el carro se sitúan los dos amplificadores g.USBamp así como el ordenador portátil encargado de recopilar las señales provenientes de las IMUs y EEG. El sujeto que realiza la prueba lleva equipado el gorro g.GAMMAcap con 32 electrodos junto a dos preamplificadores a su espalda, además de las 7 IMUs, sujetadas con cintas elásticas según lo dispuesto en la Figura 2. En la muñeca derecha se encuentra el cable de tierra.

2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

A los datos recopilados durante las pruebas se les ha realizado un posterior análisis offline. En primer lugar, se han procesado las señales extraídas de las IMUs para poder obtener la información referente al momento en el que se produce el cambio de dirección en la marcha.

Para ello se ha puesto atención en los elementos de la matriz de rotación (1), que han permitido conocer en cada instante la orientación del sujeto durante la marcha.

$$\begin{bmatrix} xx & yx & zx \\ xy & yy & zy \\ xz & yz & zz \end{bmatrix} \quad (1)$$

En este caso particular, el eje Z permanece inalterado en dirección perpendicular al plano definido por el terreno, por lo que la información del instante de giro se encuentra contenida tanto en el eje X como en el eje Y.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

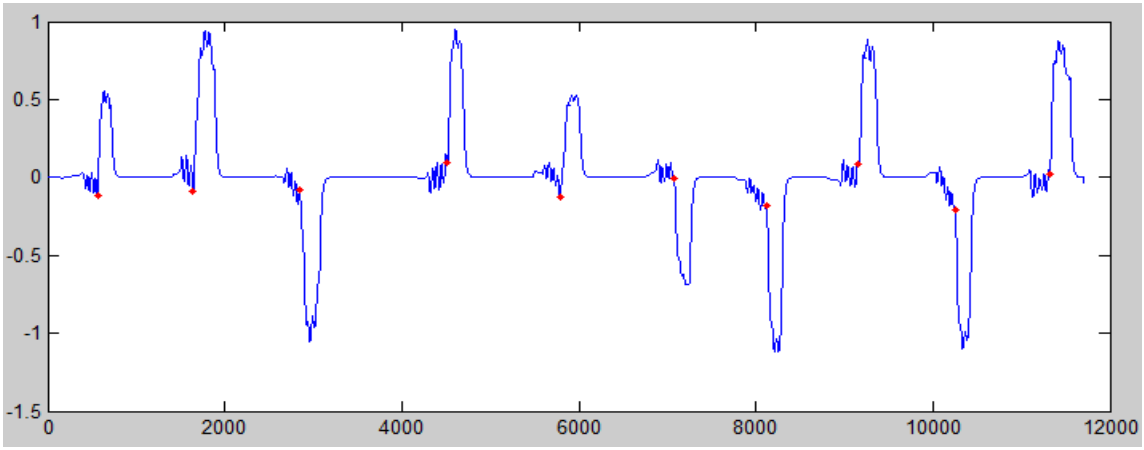


Figura 4: Resultado del procesamiento de la señal XZ. Puntuados en rojo se aprecian los instantes considerados como comienzo del cambio de dirección.

Dado que no es necesario conocer la posición angular exacta del sujeto, sino únicamente el instante donde varía la dirección de su marcha, se ha simplificado el análisis a un único elemento de la matriz de rotación (1), en concreto el elemento XZ. Su señal se ha procesado eliminando su offset inicial y mediante un filtrado paso bajo con 0,65 Hz como frecuencia de corte para eliminar las perturbaciones de alta frecuencia procedentes de las oscilaciones propias de caminar. En la figura 4 podemos apreciar un ejemplo de dicha señal procesada.

Se ha tomado como criterio de detección de los inicios de cambio de dirección, aquellos puntos de inflexión previos a un máximo cuya amplitud supere un valor de 0.3, lo cual permite diferenciar los cambios de dirección de las oscilaciones producidas por el movimiento del sujeto durante la marcha. En la figura 4 podemos observar dichos instantes puntuados en rojo. A continuación, se ha proseguido con el procesamiento de la señal EEG, teniendo en cuenta la relación entre las frecuencias de muestreo de ambas señales (1200 Hz para EEG y 30 Hz para IMUs).

Dado que el fenómeno de ERD se produce normalmente unos 2 segundos antes del inicio del movimiento [12], la señal EEG se va a dividir en ventanas que contengan este intervalo de tiempo. En concreto, se ha escogido una ventana de 2.56 segundos anterior al inicio del movimiento y 0.853 segundos posteriores a dicho inicio, teniendo en total 10 ventanas para cada una de las 8 pruebas que se realizan por sesión. El tamaño de ventana (3.413 s corresponden a 4096 muestras) se ha tomado para originar un número de muestras tal que la potencia de dos resulte un entero (para este caso 12). Esta exigencia viene establecida por el correcto funcionamiento de la Transformada de Fourier que se realizará a continuación.

Posteriormente se ha realizado un filtrado frecuencial con un filtro paso-banda Butterworth de orden 4 entre 5-40 Hz, cuya finalidad es la de eliminar la mayor parte del ruido o perturbaciones posibles sin afectar las bandas mu (8-12 Hz) y beta (13-30 Hz) [5] en las que encontraremos la mayor contribución del fenómeno ERD [12].

Se ha realizado además un filtrado Laplaciano. Este algoritmo utiliza la información recogida por el resto de electrodos y la distancia con respecto a ellos para eliminar sus contribuciones de ruido, de forma que la señal quede más suavizada. Su fórmula es la siguiente:

$$Vi^{LAP} = Vi^{CR} - \sum_{j \in Si} g_{ij} Vj^{CR} \qquad (2)$$

Donde Vi^{LAP} es la señal resultante tras aplicar el algoritmo para el electrodo i, y Vi^{CR} es la señal del electrodo i antes de ser procesada, siendo:

$$g_{ij} = \frac{\frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{j \in Si} \frac{1}{d_{ij}}} \qquad (3)$$

Siendo S_i el conjunto de electrodos que rodean al i-ésimo electrodo y d_{ij} la distancia entre los electrodos i y j.

Finalmente, se transforman las señales resultantes al dominio de la frecuencia empleando la Transformada de Fourier.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

		Sesión 1			Sesión 2		
		Derecha	**Izquierda**	**Total Acierto**	**Derecha**	**Izquierda**	**Total Acierto**
Usuario 1	**Aciertos**	100	66.66	83.33	66.66	100	83.33
	Fallos	0	33.33		33.33	0	
Usuario 2	**Aciertos**	42.85	100	71.43	80	100	90
	Fallos	57.15	0		20	0	
Usuario 3	**Aciertos**	100	60	80	42.85	100	71.43
	Fallos	0	40		57.15	0	
Usuario 4	**Aciertos**	80	100	90	75	83.33	79.16
	Fallos	20	0		25	16.66	

Tabla 1. Máximas tasas de acierto y fallo tras la validación cruzada de cada usuario. Los valores vienen expresados en porcentaje.

2.2 CLASIFICADOR

A continuación, se han escogido las características que van a definir cada clase, es decir, intención de girar a izquierdas e intención de girar a derechas. Se han declarado 3 características, siendo cada una de ellas el sumatorio de las potencias espectrales en el interior de las bandas mu y beta, dividas en 8-12 Hz, 12-24 Hz y 24-30 Hz. De esta forma, se han obtenido 3 características para cada uno de los 32 electrodos, por lo que en total tendremos 96 características que definirán cada una de las ventanas procesadas previamente.

El clasificador escogido ha sido una Máquina de Vector Soporte (SVM: Support Vector Machine) basado en la resolución progresiva cuadrática. El clasificador trabajará con la información de las 96 características obtenidas por cada ventana, junto con un vector para cada prueba, en el que se clasifican los estados como 0, cambios de dirección a derecha y como 1, cambios de dirección a izquierda. Esta información ha sido obtenida de las IMUs, tal y como se ha explicado previamente, basándonos en la señal XZ contenida en (3), la cual nos dará la información referente al sentido de giro en función de su signo.

Una vez definidas las características, se ha proseguido con una estrategia de validación cruzada, en la que se han agrupado, de entre las 8 pruebas que componen una sesión de un sujeto, las diferentes combinaciones de 7 de ellas para entrenar un modelo y generar un clasificador, quedando el restante para testear el clasificador.

Siguiendo este procedimiento, se han validado los datos extraídos de cada uno de los sujetos. Recordemos que se han realizado 2 sesiones por cada uno de los 4 sujetos que se han sometido a los experimentos, conteniendo cada sesión 8 pruebas compuestas por 10 repeticiones cada una de ellas.

Dado que las dos sesiones que se han realizado por sujeto se han realizado en días distintos, se ha llevado a cabo el procesado de esta información por separado. Esto es debido a la posible variabilidad, tanto de las condiciones del entorno, como del propio estado del sujeto, las cuales podrían afectar negativamente al resultado de la prueba.

3 RESULTADOS

Tanto las tasas de acierto como los errores de cada uno de los sujetos en cada una de sus sesiones están incluidas en la siguientes tablas, distinguiéndose los dos problemas de clasificación que consideran el cambio de dirección y mostrando los valores máximos y promedios del proceso de validación cruzada.

De este modo en la Tabla 1, se encuentra la tasa de acierto máxima que se ha llegado a obtener durante el proceso de validación cruzada. Es decir, el clasificador que mayor rendimiento ha ofrecido tras haber sido entrenado. Se puede observar tanto la tasa de acierto y fallo para cada uno de los problemas de clasificación planteados, como la tasa total de acierto del clasificador para la sesión.

Por otro lado en la Tabla 2, se muestra el valor promedio de todos los resultados obtenidos durante el proceso de validación, así como la desviación estándar de cada uno de ellos.

Durante el cálculo de los resultados se probaron diferentes tamaños de ventanas sobre la señal EEG. Se consideraron periodos más largos de tiempo, de 5 segundos previos al movimiento y 2 segundos posteriores a él, así como periodos más reducidos, de 1 segundo antes y después al inicio del movimiento, obteniendo en todos los casos resultados notablemente peores en la tasa de acierto del clasificador. Por ello se considera la ventana más

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

	Sesión 1		Sesión 2	
	Promedio	**Desv. Estándar**	**Promedio**	**Desv. Estándar**
Usuario 1	71.78	8.27	64.95	14.31
Usuario 2	52.00	12.38	71.33	9.47
Usuario 3	63.08	10.21	56.04	10.46
Usuario 4	71.62	13.52	66.95	8.06

Tabla 2. Promedio y desviación estándar del acierto de los resultados obtenidos en la validación cruzada. Los valores vienen expresados en porcentaje.

adecuada aquella que comienza 2.56 segundos previos al inicio del movimiento y se extiende 0.853 segundos posteriores a él.

Del mismo modo, se consideró emplear una única suma de frecuencias de entre las tres seleccionadas como características pero se comprobó que los resultados no mejoraban con respecto a lo que se ha obtenido con las tres bandas que definen las frecuencias mu y beta.

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Según nuestro conocimiento, este es el primer estudio en intentar clasificar la intención del cambio de dirección durante la marcha, por lo que pese a haber realizado un trabajo previo de optimización del tamaño de la ventana y de selección de la banda de frecuencia, se han seguido utilizando métodos y características comúnmente utilizados en la detección de intentos de movimiento.

Por todo ello, se plantea la alternativa de utilizar nuevos métodos de obtención de características y algoritmos de clasificación más complejos que puedan resultar más específicos del problema planteado. En este aspecto, la Minería de Datos es un campo que abre nuevas posibilidades a la hora de seleccionar las características más eficientes, pudiéndose aplicar además un clasificador más complejo basado en redes neuronales, un aspecto que se pretende estudiar en futuros trabajos.

Los resultados sin embargo, tal y como se aprecia en la Tabla 1, contienen una tasa máxima de acierto aceptable situada en torno al 80%, por lo que se puede concluir que este estudio ha demostrado que la señal EEG es clasificable para una misma acción entre diferentes localizaciones espaciales objetivo, siendo el caso concreto de los intentos de cambio de dirección de aproximadamente 45º a izquierda o derecha durante la marcha.

Pese a ello, en la Tabla 2 se observan unas tasas promedio y unas desviaciones estándares mejorables, algo que se espera mejorar en investigaciones futuras aplicando, como ya se ha comentado, nuevos métodos y clasificadores más complejos.

Además, se han realizado diferentes análisis a lo largo del procesamiento de la señal EEG. Concretamente en el aspecto del filtrado, se ha tenido en cuenta la mención de ciertos grupos que aconsejan no realizar filtrado previo a la señal EEG, ya que este provocaría una distorsión [15]. En este caso, se ha comprobado que el proceso de filtrado sobre la señal EEG es beneficioso, aportando una diferencia de hasta un 10% en la tasa de acierto respecto a la misma sesión evaluada sin filtrado previo.

Por otro lado, se ha realizado un estudio individual de las características empleadas, definidas por distintos rangos frecuenciales contenidos en las bandas mu y beta, resultando ser no beneficioso para el clasificador, por lo que se concluye que la información se encuentra distribuida a lo largo de estas dos bandas, y la no inclusión de alguna de ellas, empeorará la efectividad del clasificador.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Comisión de la Unión Europea bajo el proyecto BioMot - Smart Wearable Robots with Bioinspired Sensory-Motor Skills (con el acuerdo de subvención número IFP7-ICT-2013-10-611695) y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana de España a través de las subvenciones VALi+d ACIF/2012/135 y FPA/2014/041.

Referencias

[1] del Castillo, Mª D., Serrano, J. I., Ibáñez, J., Barrios, I. J., (2011). Metodología para la creación de una interfaz cerebro-computador aplicada a la identificación de intención de movimiento, Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI), Vol. 8, Nº.2, 2011, págs. 93-102.

[2] Dornhege, G., Millán, J.d.R., Hinterberger, T., McFarland, D. & Müller, K.-R. (Eds.) (2006). Towards Brain-Computer Interfacing. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. Forthcoming.

[3] Farina D., do Nascimento, O.F., Lucas, M.F. and Doncarli, C. (2007). Optimization of wavelets for classification of movement-related cortical potentials generated by variation of

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

force-related parameters. J. Neuroscience Methods, 162, 367-363.

[4] Grainmann B., Huggins J.E., Levine S.P. and Pfurtscheller G. (2002). Visualization of significant ERD/ERS patterns in multichannel EEG and ECoG data. Clinical Neuroph., 113, 43-47.

[5] Gutiérrez-Martinez, J., Cantillo-Negrete, J., Cariño, R. I., Elías, D., (2013). Sistemas de interfaz cerebro-computadora: una herramienta para apoyar la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora, Investigación en Discapacidad 2013; 2 (2), pp. 62-69.

[6] Gwin, J. T., Gramann, K., Makeig, S., Ferris, D. P. (2010). Removal of movement artefact from high-density EEG recorded during walking and running. J. Neurophysiol. 103. 3526-3534.

[7] Kutas, M., and Hillyard, S.A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. Nature, 307, 161-163.

[8] Matthews, R., Turner, P. J., McDonald, N. J., Ermolaev, K., Manus, T. Mc. Shelby R. A., et al (2008). Real time workload classification from an ambulatory wireless EEG system using hybrid EEG electrodes. EMBS 30th Annual International Conference of the IEEE, Vacouver.

[9] Millán, J.d.R. (2002). Brain-Computer Interfaces. In Handbook of Brain Theory and Neural Networks (Ed. M.A. Arbib), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp.178–181.

[10] Miyai, I., Tanabe, H. C., Sase, L., Eda, H., Oda, I., Konishi, I., et al. (2001). Cortical mapping of gait in humans: a near-infrared spectroscopic topography study. Neuroimage 14, 1186-1192.

[11] Pfurtscheller, G. (1992) Event-related synchronization (ERS): an electrophysiological correlate of cortical areas at rest, Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Volume 83, Issue 1, July 1992, Pages 62-69

[12] Pfurtscheller, G., Lopes da Silva, F.H. (1999) Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles, Clinical Neurophysiology, Volume 110, Issue 11, 1 November 1999, Pages 1842-1857

[13] Pfurtscheller G., Neuper C., Guger C., Harkam W., Ramoser H., Schlogl A., Obermaier B. and Pregenzer M. (2000). Current trends in Graz brain-computer interface (BCI) research. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 8, 216- 219.

[14] Priya D., Virginia R., (2013). Single-trial classification of gait and point movement preparation from human EEG, Front. Neurosci., 11 June 2013.

[15] Townsend G., Grainmann B. and Pfurtscheller G. (2006). A comparison of common spatial patterns with complex band power features in a four-class BCI experiment. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 53, 642–651.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROLLER BASED ON SLIDING MODE APPROACH

Maissa Farhat*, Oscar Barambones**, Jose A. Ramos**, Jose M. Gonzalez de Durana**

*Research Unit of Photovoltaic, Wind and Geothermal Systems, National Engineering School of Gabes, University of Gabes, Rue Omar Ibn-Elkhattab, Zrig, Gabès, 6029, Tunisia. maissa.farhat@gmail.com

**Advanced Control Group. Universidad del País Vasco, EUI, Nieves Cano 12, 01006 Vitoria, España. oscar.barambones@ehu.es

Abstract

Recently, the solar energy has become an alternative source of energy of great importance. Diverse researches and efforts have been concentrated on the photovoltaic (PV) systems efficiency improvement and the accessibility to this technology. This paper presents an intelligent approach for the improvement and optimization of the PV system efficiency. A PV system topology incorporating a maximum power point tracking controller (MPPT) is studied. In order to perform this goal a special interest was focused on the sliding mode control and the P&O algorithm. This paper presents a detailed study and design of a MPPT controller to ensure a high PV system performance which can be selected for practical implementation issue. A simulation examples shows that the MPPT is achieved using a DC/DC Boost converter between the PV system and the resistive load. Significant extracted results are given to prove the validity of the proposed overall PV system.

Keywords: PV, Boost Converter, MPPT, SMC.

1 INTRODUCTION

This work analyses the control of a stand-alone PV system. However the success of a PV application depends on whether conditions where the power electronics devices helped to extract a high power from the PV generator (PVG). The extraction of the maximum of power from the PVG is then indispensable. Therefore, maximum power point tracking (MPPT) controller accuracy becomes a key control in the device operation for successful PV applications. In general, the MPPT control is a challenging, because the sunshine condition that determines the amount of sun energy into the PVG may change at any time. Therefore, the PV system can be considered as a non-linear complex system.

Numerous MPPT methods have been developed and implemented in previous studies, for instance, perturb and observe (P&O), fractional open-circuit voltage and fuzzy logic controller (FLC) approaches [7] etc. These techniques have high tracking accuracy under stable internal and external condition, but still reveal some trade-offs between tracking speed and tracking reliability when load values or weather conditions rapidly changes [6].

Sliding mode controller has recently attracted considerable attention of researchers, The main benefit of the sliding sector technique is that it can avoid chattering [1],[8], Its advantage among, is the simplicity of implementation, robustness, and great performance in different fields such as robotic, motor control, etc. In this paper the interest was focus in the use of SMC in the photovoltaic fields by maximizing the power generated from the PV panels. Moreover, the system stability is demonstrated [2].

The main role of this controller is to generate a command using a voltage reference (V_{ref}) in order to force the system to work at the MPP. The V_{ref} is generated online via a voltage reference generator that doesn't require the irradiation measurement.

In this paper, the SMC algorithm generates directly PWM signal. This last has the benefit to avoid the use of a PWM commutation signal (Saw signal). It permits to build directly a PWM output signal toward the converter IGBT gate. Contrariwise, other algorithm such as P&O [7] generates a duty cycle signal that will be used with a reference saw signal to generate a PWM IGBT drive signal.

In general, a PV system is typically built around the following main components as shown in figure 1:

1) A PVG that converts solar energy to electric one,

2) A DC-DC converter that manipulates produced DC voltage by the PV arrays to a load voltage demand,

3) A digital controller that drives the converter operation with MPPT capability.

4) Resistive Load

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

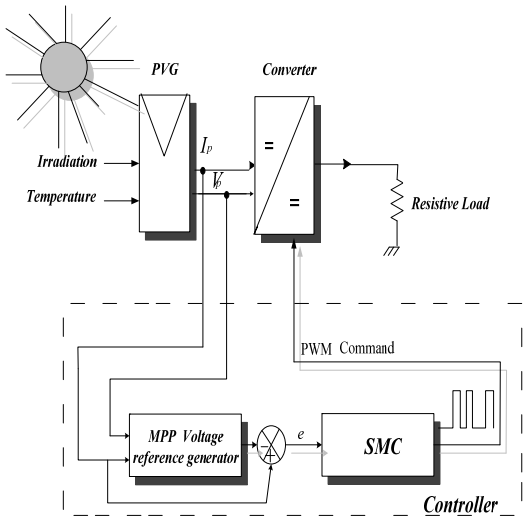


Figure 1: Synoptic diagram of PV system

2 PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION

2.1 PVG MODEL

One can substitute a PV cell to an equivalent electric circuit which includes a power supply and a diode.

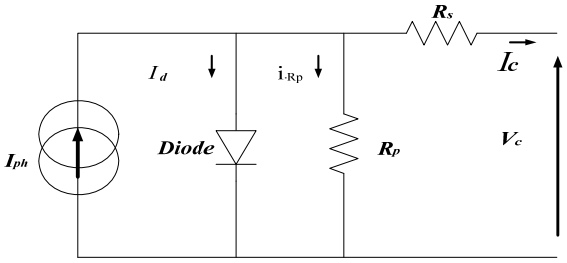


Figure 2: Simplified PV Cell Equivalent Circuit

The power source produces the I_{ph} current, which depends on impinging irradiation. Through diode flows the current I_d. The current I_c feeding the load is the difference between I_{ph} and I_d which is reduced by the resistance R_S. This last represents resistances of cell and connection among cells [5].

By exploiting the node law

$$I_c = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

The current I_{ph} can be evaluated as:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}}\left(I_{rs_ref} + K_{SCT}\left(T_c - T_{c_ref}\right)\right) \tag{2}$$

$$I_d = I_{rs}\left(\exp\frac{q\left(V_c + R_S I_c\right)}{\alpha kT} - 1\right) \tag{3}$$

$$I_{sh} = \frac{1}{R_p}\left(V_c + R_S I_c\right) \tag{4}$$

The reverse saturation current at reference temperature can be approximately obtained as:

$$I_{rs} = \frac{I_{rs_ref}}{\exp\left[\frac{qV_{oc}}{n_s.n.\beta.T_c}\right] - 1} \tag{5}$$

Finally the cell current I_c can be given by

$$I_C = I_{ph} - I_{rs}\left(\exp\frac{q\left(V_C + R_S I_C\right)}{\alpha kT} - 1\right) - \frac{1}{R_p}\left(V_C + R_S I_C\right) \tag{6}$$

The modeling of a PVG depending on series and parallel number respectively N_s and N_p as:

$$\begin{cases} I_p = N_p I_c \\ V_p = N_s n_s V_c \end{cases} \tag{7}$$

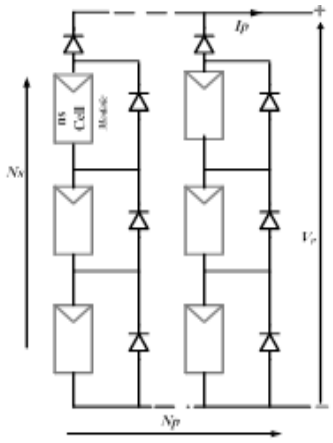


Figure 3: A PVG Group of modules; *Ns* numbers in series and *Np* in parallel.

Finally the PVG current (I_p) can be given by

$$I_p = N_p I_{ph} - N_p I_{rs}\left(\exp\frac{q}{\alpha kT}\left(\frac{V_p}{n_s N_s} + \frac{R_S I_P}{N_p}\right) - 1\right) - \frac{N_p}{R_p}\left(\frac{V_p}{n_s N_s} + \frac{R_S I_P}{N_p}\right) \tag{8}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

The highly *I-V* nonlinear characteristics are shown in figure 4 for different irradiation values.

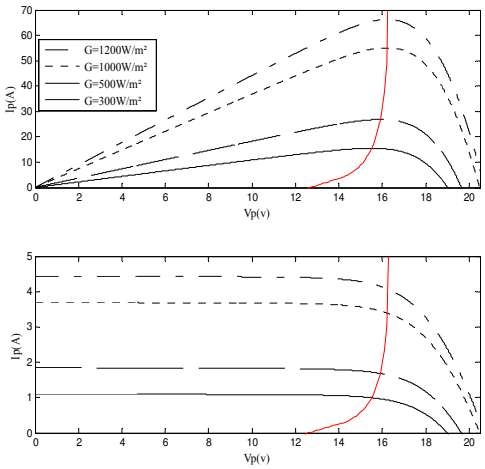


Figure 4: (a) P-V and (b) I-V characteristics at fixed temperature value of 25.3°C

2.2 BOOST CONVERTER

DC-DC converters are electronic devices used whenever is needed to change DC electrical power efficiently from one voltage level to another. They're necessary because unlike AC, DC can't simply be stepped up or down using a transformer. In many ways, a DC-DC converter feeding the load is going through a regulated converter to hold its maximum. Hence, the efficiency of the photovoltaic system is performed.

In order to step up the voltage, the operation consists of switching an IGBT shown in figure 5 at a high commutation frequency, with output voltage control by varying the switching duty cycle (D). When the IGBT is switched on, current flows from the input source through the inductor (L) and the IGBT, then the energy is stored in the inductor. After that there is no current through the Diode (D_1), and the load current is supplied by the capacitance hold charge in(C). The IGBT is turned off; L opposes any drop in current by immediately reversing its emf. So, the inductor voltage adds to (i.e., .boosts.) the source voltage and current due to this boosted voltage now flows from the source through L, D_1 and the load, recharging C as well. The output voltage is therefore higher than the input voltage, and it turns out that the voltage step-up ratio is equal to [4]

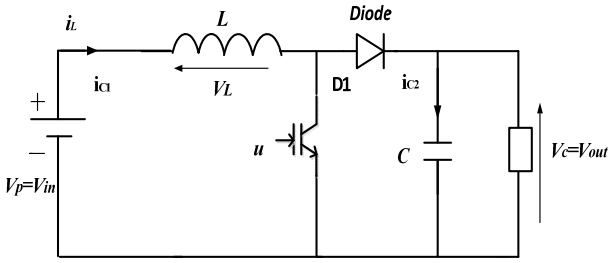


Figure 5: Circuit diagram of the Boost converter

Figure 5 shows the circuit diagram of a boost converter, and a load.

The boost converter is assumed to operate in a continuous conduction mode with two states based on the status of the switch.

$$V_O = \frac{1}{1-D} V_{in} \tag{9}$$

Based on the assumption where $P_{in}=P_{out}$ it can be deduce that

$$R_{pv} = (1-D)^2 R_{out} \tag{10}$$

Where R_{pv} is the equivalent resistance connected to the PV panel and 1-D is actually the proportion of the switching cycle that the IGBT is off, rather than on.

3 MPPT CONTROLLERS

3.1 P&O ALGORITHM

Due to its simplicity, P&O algorithm presented in figure 6 is the most popular [10], The principle of this controller is to provoke perturbation by acting (decrease or increase) on the PWM duty cycle command and observe the output PV power reaction. If the actual power P (k) is greater than the previous computed one P (K-1), then the perturbation direction is maintained otherwise it is reversed [3].

The ΔD crisp value is chosen by trial and tests in simulation. The P&O diagram is:

If the crisp value ΔD is very big or very small then we may lose information. Despite the P&O algorithm is easy to implement it has mainly the following problems

- The PV system will always operates in an oscillating mode.
- The PV system may fail to track the maximum power point and as result operate in current or voltage zones.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

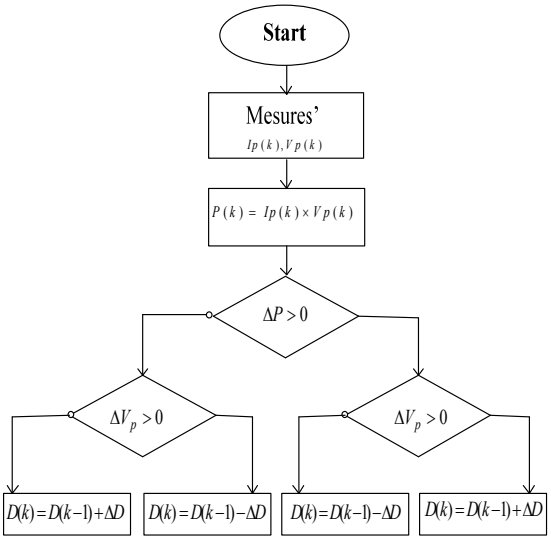


Figure 6: P&O Algorithm global structure

3.2 SLIDING MODE CONTROL

The method of control is divided into two steps the first is determine the voltage value at which the system operates with its maximum of power, and then the second is to operate the system with this voltage value that gives the maximum power.

Step 1

In this part of the work, the main objective is to construct a MPP voltage-reference generator that meets the MPP. Specifically, this generator is expected to compute on-line the optimal voltage value V_{MPP} so that, if the voltage V_p is made equal to V_{MPP} then, maximal power is captured. In fact this method does not require irradiation measurement

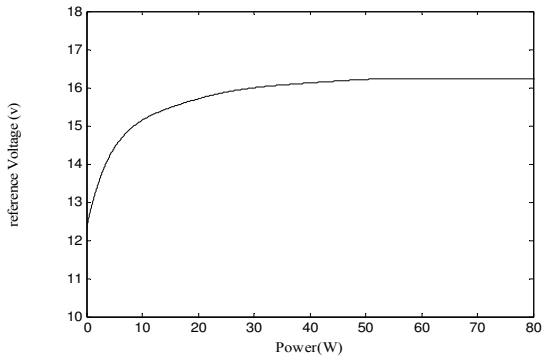


Figure 7: Optimal power-voltage characteristic

The figure 7 present the curve of optimal power-voltage characteristic obtained from the polynomial interpolation. It is easy to see from figure 4 that for any radiation G, there is a unique couple ($V_{p,}$ P) that involves the maximum of extractable power, a number of such couples for different irradiation values have been collected and then interpolated to get the suitable function (V_{MPP}= F(P_{MPP})).

This function is created using Matlab Fitting Curve Toolbox. In this work several test has been done using diferent type of function such as, Fourier, gaussian, rational, and the polynomial function like the work of Abderrahim, [10]. Finely we deduce that the power function fits more the Atersa model.
The constructed function is denoted as :

$$F(x) = a\,x^{b} + c \tag{11}$$

Where the a, b, c coefficient as numerical values specific for the used PV panel. With: a=-8.638; b=-0.1697; c=19.74;

Step 2

After determined the V_{ref} the implemented (SMC) algorithm calculate the difference between the acquired PV voltage and the V_{ref} and then, via the boost converter force the PVG to operate at the reference voltage value (V_{ref}) and therefore at the maximum power zone.

$$S = e = V_p - V_{ref} \tag{12}$$

$$u = \frac{1}{2}\left(1 + Sign(S)\right) \tag{13}$$

$$u = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S < 0 \end{cases} \tag{14}$$

Stability demonstration:

The stability can be analyzed using the Lyapunov stability method. A positive definite function V is defined as:

$$V = \frac{1}{2}S^2 > 0 \tag{15}$$

Whose time derivative is:

$$\dot{V} = S\frac{dS}{dt} = S\dot{S}$$

Considering $\begin{cases} S = e = V_p - V_{MPP}^{*} \\ \dot{S} = \dot{e} = \dot{V}p \end{cases}$

When S>0

The switch will be open, this imply that the duty cycle will increase. From the boost converter model

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

equation (10) we have, $R_{pv} = (1-D)^2 R_{out}$ and using this equation, we can observe that if the duty cycle D increases, then R_{pv}= $(1-D)^2 R_{out}$ decreases so based on the PV dynamic given by the I-V characteristic shown in figure 8, the I_p will increase and V_p will decrease equivalently from eq (8), it can be deduced that, when the voltage (V_p) increase/decrees the current (I_p) decrease/increase, so, if the resistance connected to the PV panel decrease then (I_p) increases and (V_p) decreases

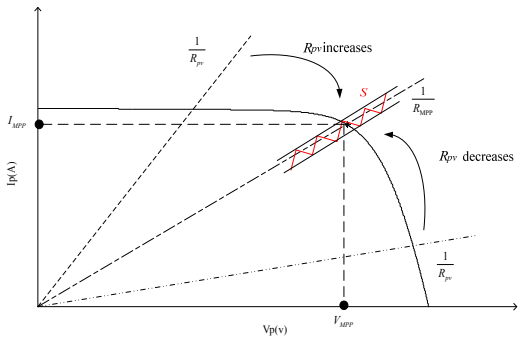


Figure 8: I-V characteristics

So as a consequence in this case, this imply that

$$\dot{V}p < 0 \quad \text{and} \quad \dot{S} < 0$$

and finally $$S\dot{S} < 0$$

When S<0 , using the same method

The switch will be close, this imply that the duty cycle will decrease. If the duty cycle D decreases, then R_{pv}= ($(1-D)^2 R_{out}$) increases so based on the PV dynamic given by the I-V characteristic shown in figure 8, the I_p will decrease and V_p increase equivalently from eq (8), it can be deduced that, when the voltage (V_p) decrease/increase the current (I_p) increase/decrease, so if the resistance connected to the PV panel increase then (V_p) increases and (I_p) decreases, and this imply that:

$$\dot{V}p > 0 \quad \text{and} \quad \dot{S} > 0$$

and then $$S\dot{S} < 0$$

Finally, using the Lyapunov stability theory it can be concluded that S reaches the state $S = 0$ means that the system reaches the desired voltage value V_{ref} and hence the convergence to the point of maximum power.

4 SIMULATION RESULTS

In this section, the PV system global control shown in figures 1 is implemented

The sliding-mode MPPT, with optimal voltage reference, is compared to P&O algorithm. The robustness of both controllers is tested over internal and external variation. The system is tested over a sudden step load variation and irradiation change.

Figure 9 present the I-V and P-V characteristic at fixed temperature and different irradiation values (500 and 1000W/m²)

Figures 10, 11 show respectively the irradiation and load variation.

Figure 12 (a) shows the controllers output. The SMC build directly a PWM output Signal toward the converter IGBT gate, however the P&O algorithm generate a duty cycle signal that will be used with a reference saw signal (MLI) to generate a PWM IGBT drive signal. Figure 12(b) in a zoom of figure 12 (a) and shows the impact of the irradiation variation on the SMC frequency.

Figures 13, 14, 15 show the PVG current, voltage and power respectively. These figures show that in spite of the load change: the operation point of the PV remains constant in the MPP due to the robustness of controllers. When the irradiation changes, the MPP also changes its position, so the controller act in order to track the new MPP.

Figure 16 and 17 show the load voltage and current.

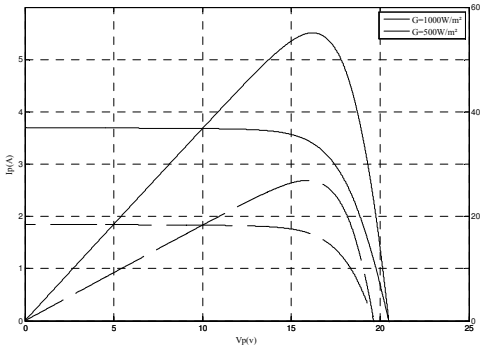


Figure 9: I-V and P-V characteristic under constant temperature (25°C)

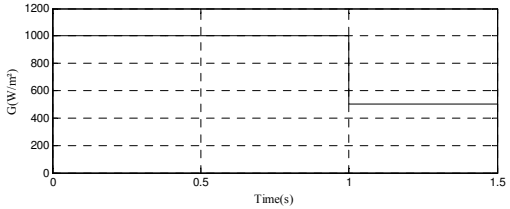


Figure 10: irradiation

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

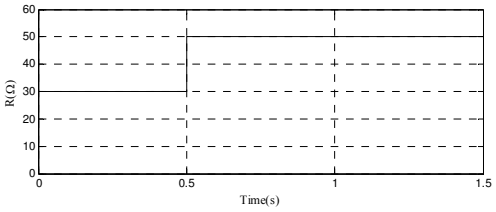


Figure 11: Load Value

(a)

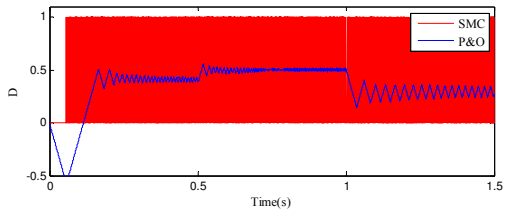


Figure 12 a: Controller output

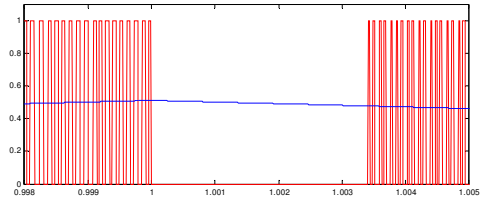


Figure 12 b: Controller output

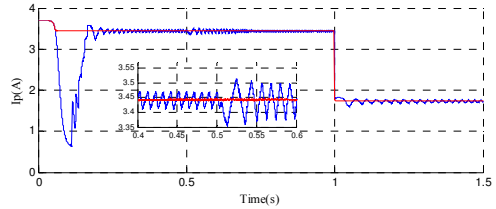


Figure 13: PVG current

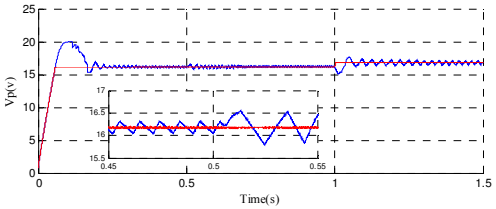


Figure 14: PVG Voltage

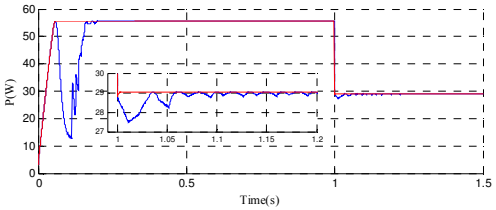


Figure 15: PVG Power

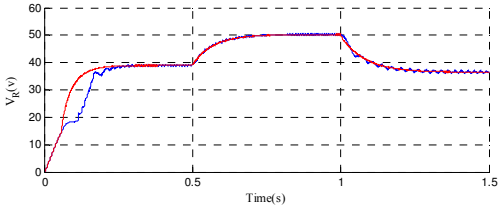


Figure 16: The load voltage

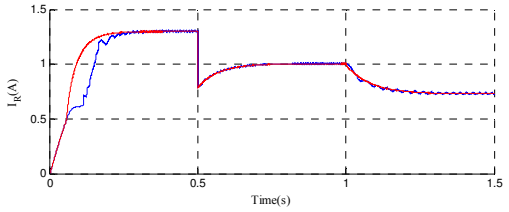


Figure 17: current Load

The obtained simulation results show that both systems using different controller present a good maximum power tracking, however the SMC controller present less oscillations and fast tracking in the response.

5 CONCLUSION

In this work, a complete study of PV systems integrating an MPPT controller was studied. The proposed PV system is composed of a PV generator, a boost converter and a resistive load. In order to bring up the system efficiency a designed SMC MPPT controller was presented. This controller guarantees high dynamic system performances. Simulation results are given to highlight the obtained performances. This study is the foundation of a practical implementation follow-up this research work.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Universidad del País Vasco (GIU13/41 y UFI11/07)

APPENDIX A

G,Gref	Global, Reference insulation (W /m^2).
I p, Vp	Cell output current and voltage.
Rp, Rs	Cell parallel and series resistance (Ω).
n	Solar ideal factor
Eg	Band gap energy (ev)
Irs	Reverse diode saturation current (A)
K_{SCT}	Short circuit current temperature (A/°K).
Tc, Tc_ref	Cell junction and Reference temperature (°C).
β	Boltzmann constant (1. 38e-23)
D	duty cycle
Ns, Np	Number of series and parallel modules.
ns	Number of series cells

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] A. Alqahtani, V. Utkin in. (2012), Self-Optimization of Photovoltaic System Power Generation Based on Sliding Mode Control. Proceedings of IECON'12.

[2] A.Cid-Pastor. (2013), Synthesis of loss-free resistors based on sliding-mode control and its applications in power processing. Control Engineering Practice, vol. 21, pp.689-699.

[3] E.F. Abderrahim, G .Fouad., M.Abdel moinime (2013), Reference Voltage Optimizer for Maximum Power Tracking in Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems, Journal of Control and Systems Engineering vol.1, n. 2, pp.57-66

[4] J.Park, S, Kim, (2012), Maximum Power Point Tracking Controller for Thermoelectric Generators with Peak Gain Control of Boost DC–DC Converters, 'Journal of Electronic Materials, vol. 41, pp. 1242-1246.

[5] M. Farhat, and L. Sbita., (2012), Advanced ANFIS-MPPT Control Algorithm for Sunshine photovoltaic Pumping Systems," International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology.

[6] M. Veerachary,T. Senjyu., and K. Uezato, (2002). Feedforward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 38, pp. 969-981.

[7] T. Esram, P. L. Chapman, (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE transactions on energy conversion vol. 22.

[8] Y.Levron and D. Shmilovitz, (2013), Maximum power point tracking employing sliding –mode control. IEEE Trans. on Circuits and Systems vol. 60, pp.724-731.

[9] Z. Shiqiong., Longyun . K, Jing. S, Guifang .G, Bo Cheng,. B Cao, Yiping . T (2010), A novel maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic, system, International Journal of Control, Automation and Systems, vol.8,n. 6, pp. 1364-1371.

[10] Z. Zaidi., F. Boudjema, (2010), Hybrid Control and Optimization of a Plus-Energy-House with DHWS, International Renewable Energy Congress IREC, Sousse, Tunisia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Comparación de estrategias de control multivariable sobre el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia

Sergio Fragoso Herrera, Francisco Vázquez Serrano, Juan Garrido Jurado
Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España,
e-mail: p52frhes@uco.es fvazquez@uco.es jgarrido@uco.es

Fernando Morilla García
Departamento de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, Madrid, España,
e-mail: fmorilla@dia.uned.es

Resumen

Los sistemas de conversión de energía eólica se pueden considerar como procesos multivariables con dos salidas (velocidad angular de giro y potencia generada) y dos entradas (ángulo de paso de pala, y de manera indirecta, par generado). Sin embargo, es habitual que estén controlados por sistemas de control descentralizados, que se diseñan sin tener en cuenta la interacción entre dichas variables. Este trabajo presenta un estudio comparativo de varios esquemas de control por desacoplo, que sí buscan una reducción de la interacción entre los lazos de control, con el esquema descentralizado clásico. El estudio se ha hecho en simulación sobre un modelo lineal obtenido por identificación para un aerogenerador real de pequeña potencia de velocidad y ángulo de paso de pala variable.

Palabras Clave: Control multivariable, desacoplo, aerogeneradores, identificación.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de conversión de energía eólica o WECS (*Wind Energy Conversion Systems)* como la mayoría de los procesos industriales son complejos y multivariables en esencia. Se componen de varias variables de medida y varias señales de control, y a menudo presentan complejos acoplamientos entre ellas, lo cual puede dificultar el diseño del sistema de control.

Muchos métodos de control multivariable han sido implementados en aerogeneradores mediante diversos esquemas de control. En la Figura 1 se muestra el esquema de control multivariable general usado en este trabajo. En este esquema las variables a controlar de velocidad angular ω_r y potencia generada P_g son realimentadas hacia un controlador multivariable que establece los valores de las variables manipuladas de ángulo de paso de pala β, y de forma indirecta el par generado τ_g, como se comentará más adelante.

Tradicionalmente la ingeniería de control ha resuelto el problema del acoplamiento mediante el uso controladores monolazo PID [10], los cuales son adecuados cuando el nivel de interacción entre las diferentes variables no es muy elevado. Sin embargo, cuando las interacciones son más significativas, el desacoplamiento es tratado ineficientemente por parte de estos controladores. Es en este punto donde las estrategias de control multivariable centralizadas mediante técnicas de desacoplo [4] dan respuesta a la posible pregunta de si es posible reducir los efectos indeseados de la interacción que se producen en otras estrategias descentralizadas.

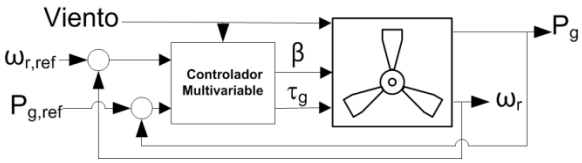


Figura 1: Esquema de control multivariable general

En este trabajo se proponen diversas estrategias de control multivariable por desacoplo que intentan mejorar el desempeño del sistema cuando las interacciones son significativas. Estas se aplican a, y toman como punto de partida para su diseño, el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia de velocidad y ángulo de paso de pala variable. Dicho modelo es obtenido por identificación a partir de un aerogenerador experimental ubicado en los laboratorios del Departamento de Informática y Análisis Numérico de la Universidad de Córdoba. Los parámetros técnicos, así como la descripción del sistema de adquisición y control utilizado aparecen documentados en [2].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta el modelo lineal obtenido del proceso de identificación en base a los datos experimentales. La sección 3 muestra todo el proceso de diseño de los controladores multivariables. En la sección 4 se presentan los resultados de comparación de las diferentes estrategias, y finalmente en la sección 5 se resumen las principales conclusiones

2. MODELO IDENTIFICADO

El aerogenerador experimental bajo estudio es un sistema fundamentalmente con dos entradas y dos salidas, donde el vector de entrada u está compuesto por el ángulo de paso de pala β en el rango 0-25°, y el ciclo de trabajo α en el rango 0-100%. Este ciclo de trabajo determina la lógica de conmutación PWM de un semiconductor que forma parte de un circuito de electrónica de potencia acoplado entre la salida del generador eléctrico y la carga [3]. Este circuito permite modificar la resistencia de carga del aerogenerador, permitiendo manipular así la corriente de salida del mismo, y por tanto permitiendo modificar el par generado.
El viento es una variable manipulable en el aerogenerador experimental, para que se puedan recrear distintas condiciones de operación, pero desde el punto de vista de control tendrá la consideración de perturbación medible, como se muestra en la Figura 1.

El vector de salida y está compuesto por la velocidad angular de giro ω_r en rpm, y por la potencia eléctrica generada P_g en W.

Por otro lado, el aerogenerador es un proceso esencialmente no lineal debido principalmente a su comportamiento aerodinámico. Tradicionalmente se utiliza el término $C_p(\lambda,\beta)$ o coeficiente de potencia, que permite caracterizar esta dinámica no lineal, y que será descrito y obtenido experimentalmente en el siguiente apartado.

Las metodologías propuestas en este trabajo se basan en sistemas lineales, por lo que es necesario obtener un modelo lineal aproximado del proceso experimental de tal forma que este estuviera definido como se muestra en la expresión (1), donde la matriz $G(s)$ representa la matriz de funciones de transferencia del proceso, y la matriz $G_D(s)$, la del modelo de perturbación asociado a la entrada de viento v.

$$\begin{pmatrix}\omega_r\\ P_g\end{pmatrix} = G(s)\begin{pmatrix}\beta\\ \alpha\end{pmatrix} + G_D(s)v \qquad (1)$$

2.1. CURVA CARACTERÍSTICA DEL AEROGENERADOR. COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia C_p es el parámetro considerado más importante para el diseño del controlador en un WECS, especialmente en el caso de la regulación de la potencia generada [1]. Este parámetro representa la eficiencia del aerogenerador, y se define como la fracción de energía eólica extraída por la turbina del total de energía disponible que fluye a través del área barrida por el rotor.

El coeficiente de potencia es una función no lineal dependiente del coeficiente de velocidad específica λ (*tip-speed-ratio*), el cual a su vez depende de la velocidad del viento, y del ángulo de paso de las palas β (*Pitch*). En la práctica, el coeficiente de potencia es difícil de obtener y varía de un aerogenerador a otro. Se usan modelos analíticos para describirlo [11]; sin embargo, estos modelos son sólo aproximados y en muchos casos no hay una justificación válida para su uso.

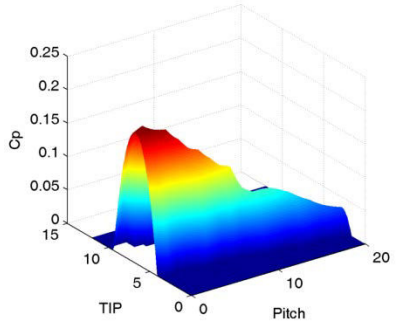


Figura 2: Coeficiente de potencia $C_p(\lambda,\beta)$ experimental obtenido mediante extrapolación

En la Figura 2, se muestra la representación gráfica del coeficiente de potencia C_p frente al coeficiente de velocidad específica λ (*TIP*) y al ángulo de paso de pala β (*pitch*) que se ha obtenido experimentalmente para el aerogenerador de pequeña potencia bajo estudio. Para cada valor de β, pueden obtenerse curvas polinómicas que muestran el coeficiente de potencia frente a λ, las cuales pueden ajustarse mediante expresiones del tipo.

$$C_p(\lambda)\big|_{\beta=cte} = c_1\lambda^2 + c_2\lambda + c_3 \qquad (2)$$

En la misma Figura 2 se muestra la existencia de un punto óptimo para λ y β donde el coeficiente de potencia es máximo. Este punto óptimo se corresponde con los valores 6.8 de coeficiente de velocidad específica y un 1º de ángulo de paso de pala.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.2. MODELO LINEAL

El modelo lineal ha sido obtenido a partir de un proceso de identificación usando los datos arrojados por la planta trabajando sobre un punto de operación límite entre la zona subnomimal y nominal. El punto de operación está definido por la velocidad nominal del equipo y por el valor del coeficiente de velocidad específico óptimo de la Figura 2. La ecuación (3) obtiene las condiciones de velocidad del viento que se deben dar para operar en dicho punto, donde R representa el radio del rotor.

$$v_{nom} = \frac{\omega_{r_nom} \cdot R}{\lambda_{opt}} \approx 8\ m/s \qquad (3)$$

En esta zona de operación de transición entre dos regiones de funcionamiento del aerogenerador es donde a priori pueden manifestarse mayores interacciones entre las variables. Esta zona define el límite máximo donde la velocidad angular debe seguir la referencia óptima establecida mediante las técnicas habituales de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT *Maximum Power Point Tracking*) antes de entrar en la zona nominal de velocidad. Para situar al aerogenerador en este punto, en lazo abierto el vector de entrada debe estar compuesto por los valores que optimizan la velocidad angular $u = [1°, 70\ \%]$. El vector de salida en lazo abierto se compone del valor óptimo de la velocidad angular, y del valor de potencia eléctrica generada asociada a esa velocidad $y = [1746\ rpm, 6.6\ W]$. Estos datos definen el punto de operación en torno al cual se lleva a cabo la identificación.

El modelo resultante, obtenido de la herramienta de identificación de Matlab, se muestra en (4) donde los modelos de cada elemento tienen un ajuste en torno al 90%.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{-8.3951}{118.4s^2 + 21.77s + 1} & \frac{-491.4}{35.36s^2 + 11.89s + 1} \\ \frac{-0.06102}{16.93s + 1} & \frac{6.7614}{0.93526s + 1} \end{pmatrix}$$

$$G_D(s) = \begin{pmatrix} \frac{345}{104.6s^2 + 20.45s + 1} \\ \frac{2.341}{41.53s^2 + 14.85s + 1} \end{pmatrix} \qquad (4)$$

En la Figura 3 se muestra el ajuste entre los datos experimentales y el modelo identificado. El ensayo para la identificación se ha realizado en torno al punto de operación definido anteriormente. Para obtener $g_{11}(s)$ y $g_{21}(s)$ se aplica un escalón de +8º y tras 600 segundos uno de -8º para volver al punto inicial. Similarmente, para obtener $g_{12}(s)$ y $g_{22}(s)$ se aplica un salto de -10% en el ciclo de trabajo y de +10%. Para obtener las funciones de $G_D(s)$ se aplica una transición en la entrada de viento de -1 m/s y luego de +1m/s.

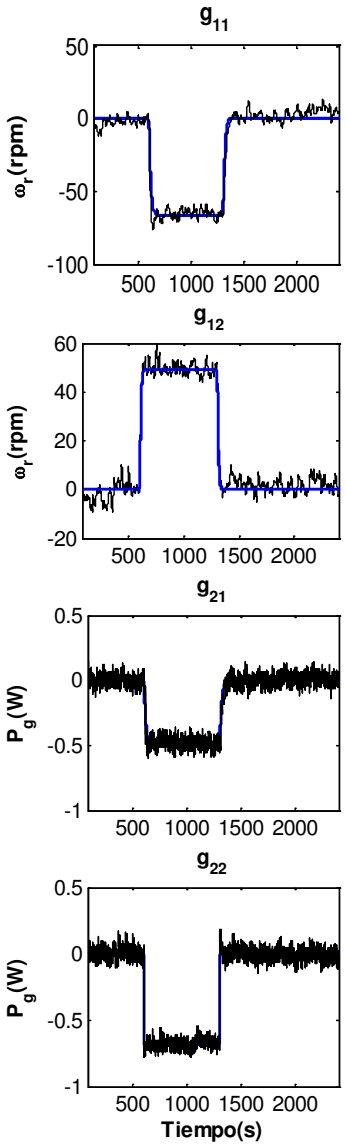


Figura 3: Ajuste de los datos experimentales y el modelo identificado

3. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

3.1. ANÁLISIS DE INTERACCIÓN

Como se ha discutido anteriormente, el nivel de interacción entre variables supone una dificultad para el control de un proceso multivariable, por lo que es muy importante conocer el grado de interacción para seleccionar la estrategia de control adecuada.

Mediante la clásica matriz de ganancias relativas o RGA (*Relative Gain Array*) es posible medir el grado de interacción que existe entre variables manipuladas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

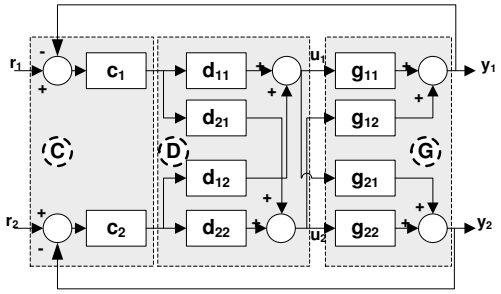
y controladas, así como poder seleccionar el emparejamiento entre las mismas que presente a priori mejor controlabilidad.

La RGA del modelo se muestra en (5). Se observa que el nivel de interacción adquiere un valor significativo en esta zona, y que el emparejamiento más adecuado debería ser el marcado por la diagonal principal de la matriz del proceso $u_1 - y_1$ y $u_2 - y_2$. Este emparejamiento es el que se ha considerado en el esquema de control descentralizado de la Figura 1.

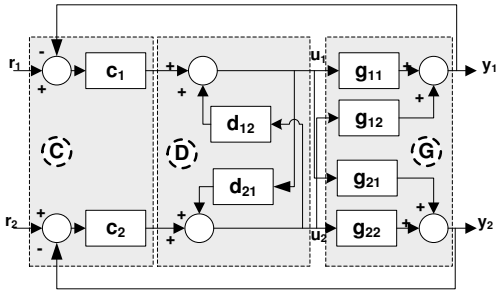
$$RGA = \begin{pmatrix} 0.6543 & 0.3457 \\ 0.3457 & 0.6543 \end{pmatrix} \quad (5)$$

3.2. CONTROL CENTRALIZADO CON DESACOPLO

Hay dos aproximaciones al control centralizado: una estrategia centralizada pura [6] o una red de desacoplo combinada con un control descentralizado diagonal [9]. Este último puede ser diseñado combinando un controlador diagonal $C(s)$, con un bloque compensador diagonal $D(s)$, de tal forma que el controlador vea el proceso aparente $Q(s) = G(s) \cdot D(s)$, como un conjunto de n procesos completamente independientes. El diseño de la red de desacoplo para un proceso $n \times n$ es obtenido especificando n elementos del compensador $D(s)$, o las n funciones de transferencia deseadas del proceso aparente $Q(s)$.



(a)



(b)

Figura 4: Sistemas de control por desacoplo para un proceso 2x2: (a) desacoplo convencional; (b) desacoplo inverso

La mayoría de las aproximaciones a un control por desacoplo usan un esquema de desacoplo convencional en el cual las entradas del proceso son derivadas de una combinación de las salidas del controlador realimentadas, Figura 4a. Existen dos métodos para el diseño de la red de desacoplo convencional: dinámico, cuando $D(s)$ es obtenida a partir del proceso $G(s)$, tal y como muestra (6), y estático, cuando sólo se utiliza la ganancia en estado estacionario $G(0)$.

$$D(s) = G^{-1}(s) \cdot Q(s) \quad (6)$$

Al mismo tiempo generalmente se suelen asumir dos simplificaciones a estos dos métodos, que constituyen el desacoplo simplificado, donde los elementos de la diagonal principal de la red de desacoplo son considerados la unidad.
Usando la estructura del desacoplo inverso de la Figura 4b, es posible mantener el mismo proceso aparente $Q(s)$ del desacoplo ideal, mientras se siguen usando los elementos de la red desacoplo simplificado [5]. La matriz de desacoplo $D(s)$ se divide en dos matrices: una matriz $D_d(s)$ en el camino directo entre las salidas del controlador y las entradas del proceso, y una matriz $D_o(s)$ en el camino inverso entre las salidas y las entradas del controlador. La expresión de la matriz de desacoplo completa $D(s)$ es obtenida como sigue:

$$D(s) = D_d(s) \cdot (I - D_o(s) \cdot D_d(s))^{-1} \quad (7)$$

La Tabla 1 del apéndice A recoge las tres matrices compensadoras obtenidas tras aplicar las diversas técnicas de desacoplo, conjuntamente con los procesos aparentes que constituyen el elemento fundamental para la sintonía del controlador diagonal.

3.3. COMPENSACIÓN FEEDFORWARD

Como complemento a la estrategia de control multivariable centralizada con desacoplo se ha incorporado en algunas técnicas una compensación feedforward. El problema de control feedforward se muestra en la Figura 5. El objetivo del diseño del compensador feedforward g_{ff}, es que los efectos de la entrada de perturbación d, en este caso el viento, se minimicen a la salida del proceso y.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

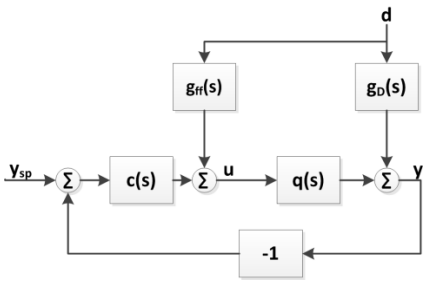


Figura 5: Diagrama de bloques que ilustra el esquema de compensación feedforward

En la ecuación (9) del apéndice A se muestran las funciones de transferencia de compensación feedforward para el punto de operación analizado en este trabajo aplicado al desacoplo simplificado dinámico, y al desacoplo inverso. Estas técnicas de desacoplo permiten diseñar la compensación feedforward perfecta puesto que generan procesos aparentes completamente diagonales.

3.4. SINTONÍA DE CONTROLADORES

Después de determinar las redes de desacoplo, los parámetros del controlador descentralizado $C(s)$

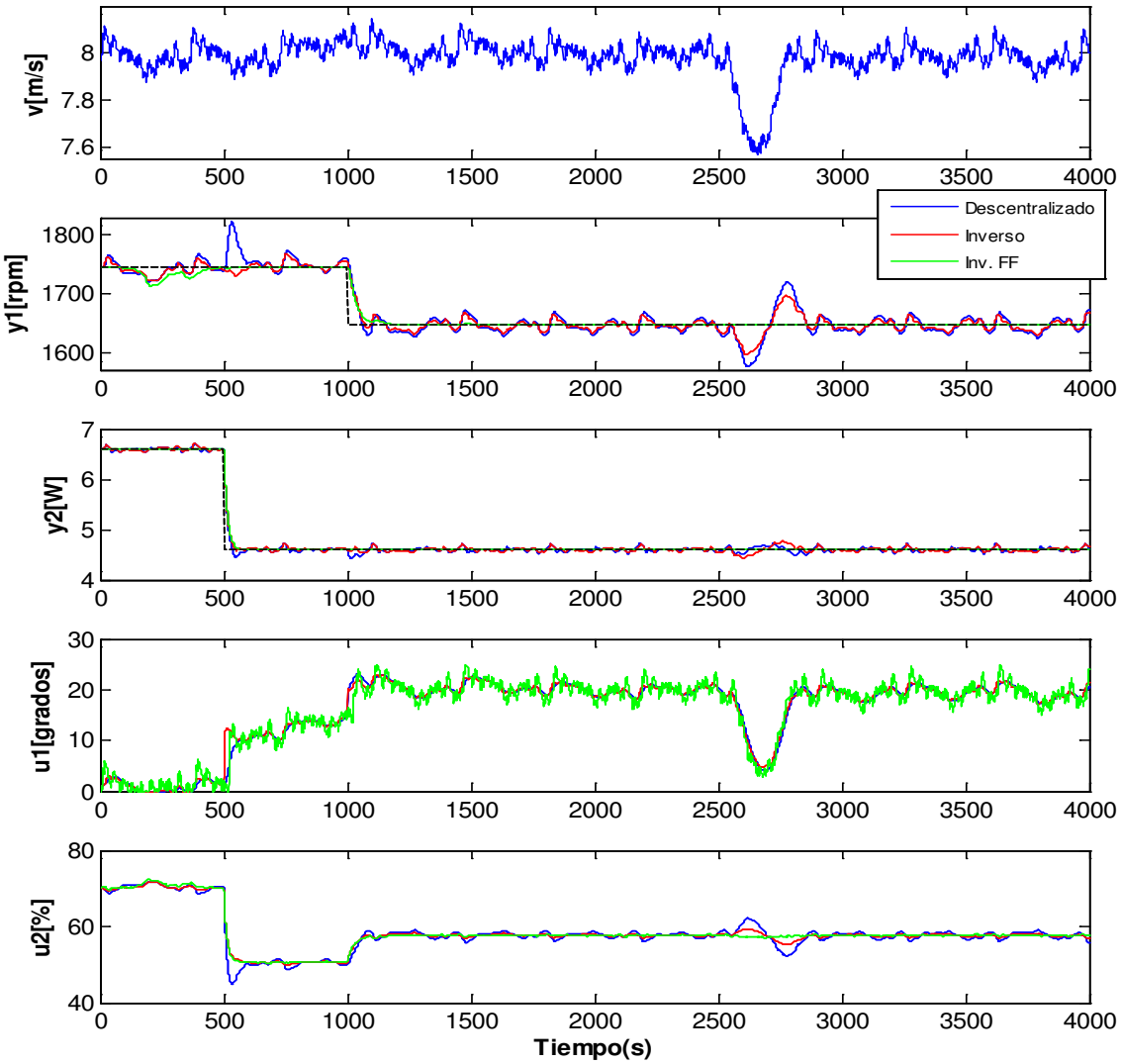


Figura 6: Registro de salida (viento, salidas, señales de control) de la simulación en lazo cerrado

La compensación feedforward perfecta se obtiene cuando,

$$g_{ff}(s) = \frac{-g_d(s)}{q(s)} \qquad (8)$$

pueden ser sintonizados independientemente, mediantes técnicas de sintonía de procesos monovariables que garanticen la estabilidad y desempeño de cada lazo [8]. En este trabajo se ha recurrido a la sintonía por especificación de margen de fase. Se ha especificado un margen de fase de 60° para ambos lazos con un controlador PI. El resultado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la sintonía para cada estrategia de control se recoge en la Tabla 2 del apéndice A.

4. RESULTADOS

Con la ayuda de un modelo de viento que permite reconstruir perfiles de velocidad del viento con diferentes componentes (turbulencia, ráfaga,…) [7] se ha simulado la respuesta del sistema en lazo cerrado para las diferentes estrategias de control propuestas.

La respuesta en lazo cerrado de algunas de las estrategias consideradas se muestra en la Figura 6, donde se representan las salidas, señales de control, así como, el perfil de la velocidad de viento generado. El resto de estrategias presentan unos resultados similares, así que con el objetivo de aclarar la figura, sólo se muestran a modo ilustrativo, la estrategia descentralizada puro, y las estrategias con desacoplo inverso con y sin compensación feedforward. El perfil de viento se constituye de una componente media de 8 m/s a la cual se le ha agregado una componente turbulenta de 0.1 m/s, y una componente de ráfaga de 0.5 m/s entre los 2500 y 2700 segundos de simulación.

Ambos lazos comienzan la simulación teniendo establecidas las consignas sobre el punto donde se ha obtenido el modelo. A los 500 segundos de simulación se produce una reducción de 2W en la consigna de potencia eléctrica generada, lo cual se puede corresponder con una modificación en las condiciones de carga del sistema. A los 1000 segundos de simulación, el lazo de control de velocidad angular cambia su valor de referencia de los 1746 rpm a las 1646 rpm, para comprobar cómo responde el sistema de control frente a este tipo de cambio.

La Tabla 3 del apéndice A muestra una comparación del resultado de simulación entre todas las estrategias de control a través de diversos índices de desempeño, como el IAE, el IADU y el valor de desviación estándar.

Con los índices de la Tabla 3 se observa que en este punto de operación analizado del aerogenerador, las estrategias de control con desacoplo mejoran en la mayoría de los casos el índice de desempeño IAE del lazo de control de velocidad en comparación con la estrategia descentralizada pura. Esto mismo no ocurre sin embargo en el lazo de control de potencia, donde la estrategia descentralizada tiene un valor de IAE menor que la mayoría de las estrategias con desacoplo. En cuanto al desempeño de las señales de control, las estrategias con desacoplo mejoran al control descentralizado puro en el tratamiento de la segunda señal de control, siendo este último más eficiente en la manipulación de la primera señal de control. Cabe destacar la mejoría del resultado de las técnicas con compensación feedforward con respecto a sus homónimas sin compensación en lo referente a los índices IAE, y a la desviación estándar.

5. CONCLUSIONES

Un sistema de conversión de energía eólica se ha utilizado en este trabajo como ejemplo de proceso en el que el nivel de interacción entre variables es un factor a considerar a la hora de elegir y diseñar la estrategia de control. Mediante simulaciones, que emplean el modelo lineal identificado para un punto de operación de un aerogenerador real de laboratorio, se han comparado varios esquemas de control por desacoplo con el esquema descentralizado clásico, llegando a resultados interesantes en cuanto a índices de desempeño. Estos resultados muestran que las estrategias multivariable centralizadas mediante redes de desacoplo podrían ser una buena alternativa en el control de este tipo de sistema, sobre todo en aquellas zonas de operación donde el nivel de interacción adquiere un valor significativo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Excelencia P10-TEP-6056 Junta de Andalucía, España.

Referencias

[1] Dodson L., Busawon K., and Jovanovic M., “Estimation of the power coefficient in a wind conversion system,” in *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, 2005, pp. 3450–3455.

[2] Fragoso S., Vázquez F., and Morilla F., “Control Multivariable Descentralizado de un Aerogenerador Experimental de Pequeña Potencia,” in *XXXIV Jornadas de Automática*, 2013.

[3] Fragoso S., Vázquez F., and Morilla F., “Control de velocidad mediante paso de pala para un aerogenerador experimental de pequeña potencia,” in *XXXIV Jornadas de Automática*, 2013.

[4] Garrido J., Vázquez F., Morilla f., and Hagglund T., “Practical Advantages of

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Inverted Decoupling," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, Jul. 2011.

[5] Garrido J, Vázquez F., and Morilla F., "An Extended Approach of Inverted Decoupling," *J. Process Control*, vol. 21, no. 1, pp. 55–68, Jan. 2011.

[6] Garrido J., Vázquez F., and Morilla F., "Multivariable PID Control by Decoupling," *Int. J. Syst. Sci.*, 2014.

[7] González M., Vázquez F., and Morilla F., "Control Multivariable Centralizado con Desacoplo para Aerogeneradores de Velocidad Variable," *Rev. Iberoam. automática e informática Ind.*, vol. 7, no. 4, pp. 53–64, Oct. 2010.

[8] Morilla F., Vázquez F., and Garrido J., "Centralized PID Control by Decoupling for TITO Processes," in *13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2008, pp. 1318–1325.

[9] Nordfeldt P., "PID Control of TITO Systems," Lund University, 2005.

[10] Pao L.Y. and Johnson K.E., "A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms," in *2009 American Control Conference*, 2009, pp. 2076–2089.

[11] Xia Y., Ahmed K.H., Member S., and Williams B.W., "Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1122–1132, 2013.

APÉNDICE A

Tabla 1: Matrices de desacoplo y procesos aparentes obtenidas a partir del modelo (4)

Método de desacoplo	$\boldsymbol{D(s)}$
Simplificado Dinámico	$\begin{pmatrix} 1 & \frac{-196s^2-36.04s-1.655}{s^2+0.3363s+0.02828} \\ \frac{0.0004986s+0.0005331}{s+0.05907} & 1 \end{pmatrix}$
Simplificado Estático	$\begin{pmatrix} 1 & -58.5341 \\ 0.00902 & 1 \end{pmatrix}$
Inverso	$D_d(s)=1, D_o(s)=\begin{pmatrix} 1 & \frac{-196s^2-36.04s-1.655}{s^2+0.3363s+0.02828} \\ \frac{0.0004986s+0.0005331}{s+0.05907} & 1 \end{pmatrix}$
	$\boldsymbol{Q(s)}$
Simplificado Dinámico	$\begin{pmatrix} \frac{-0.07s^3-0.03s^2-0.004s-0.0001}{s^5+0.57s^4+0.12s^3+0.01s^2+0.0007s+1.4\cdot10^{-5}} & 0 \\ 0 & \frac{7.93s^3+3.71s^2+0.49s+0.018}{s^4+1.46s^3+0.47s^2+0.05s+0.001} \end{pmatrix}$
Simplificado Estático	$\begin{pmatrix} \frac{0.21s^2-0.03s-0.002}{s^3+0.24s^2+0.01s+0.0004} & \frac{-423.2s^2-156.2s-26.83}{s^3+1.4s^2+0.38s+0.03} \\ \frac{-0.003s^2-0.001s-6.81\cdot10^{-5}}{s^3+0.24s^2+0.01s+0.0004} & \frac{7.22s^2+2.3s+0.07}{s^3+1.4s^2+0.38s+0.03} \end{pmatrix}$
Inverso	$\begin{pmatrix} \frac{-8.3951}{118.4s^2+21.77s+1} & 0 \\ 0 & \frac{6.7614}{0.93526s+1} \end{pmatrix}$

$$G_{ff_simp}(s)=\begin{pmatrix} \frac{42.38s^5+24.54s^4+5.477s^3+0.587s^2+0.03s+0.00059}{s^5+0.66s^4+0.16s^3+0.018s^2+0.001s+2.22\cdot10^{-5}} \\ \frac{-0.007s^4-0.01s^3-0.003s^2-0.0003s-1.26\cdot10^{-5}}{s^5+0.829s^4+0.25s^3+0.03s^2+0.002s+5.59\cdot10^{-5}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$G_{ff_inv}(s) = \begin{pmatrix} \dfrac{40848s^2 + 7511s + 345}{878.1s^2 + 171.7s + 8.395} \\ \dfrac{-2.189s - 2.341}{280.8s^2 + 100.4s + 6.761} \end{pmatrix}$$

Tabla 2: Parámetros de los controladores PI

Método	**PI Parámetros**			
	$k_{p1}\left(\frac{grados}{rpm}\right)$	$k_{p2}\left(\frac{\%}{W}\right)$	$T_{i1}(s)$	$T_{i2}(s)$
Desacoplo Simplificado Dinámico	-0.054	0.0051	17.13	0.51
Desacoplo Simplificado Estático	-0.062	0.0096	13.71	0.75
Desacoplo Inverso	-0.054	0.0051	17.13	0.51
Descentralizado puro	-0.024	0.064	23.30	0.66

Tabla 3: Índices de desempeño y desviación estándar

Estrategia	**IAE_1**	**IAE_2**	**$IADU_1$**	**$IADU_2$**	**$std(y_1)$[rpm]**	**$std(y_2)$[W]**
Desacoplo Simplificado Dinámico	$3.86 \cdot 10^6$	13196	205.03	1.06	45.43	0.3318
Desacoplo Simplificado Estático	$3.16 \cdot 10^6$	17288	222.12	0.87	43.68	0.3348
Desacoplo Inverso	$3.72 \cdot 10^6$	15229	182.12	0.78	44.10	0.3335
Desacoplo Simplificado Dinámico con Feedforward	$1.21 \cdot 10^6$	3183.7	1389.6	1.47	43.98	0.3304
Desacoplo Inverso con Feedforward	$1.46 \cdot 10^6$	1478.8	1482.1	1.44	42.11	0.3382
Descentralizado puro	$5 \cdot 10^6$	14555	138.58	1.55	46.94	0.3347

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Casos de uso y mejoras de un robot humanoide de bajo coste

Juan C. García, Javier Felip, Carlos Veiga, Pedro J. Sanz
Universitat Jaume I
{garciaju, jfelip, carlos.veiga, sanzp}@uji.es

Resumen

El presente artículo muestra el trabajo realizado en el grupo de investigación IRSLab para mejorar la plataforma usada en la iniciación de los alumnos de grado en el mundo de la robótica. Para ello, se usa uno de los modelos de robots humanoides de bajo coste más usados en este sector, el robot RoboNova. Así mismo, se explican las distintas evoluciones que se le han hecho a dicho robot para aprovechar el potencial de las nuevas tecnologías. Estas mejoras abarcan desde la utilización de un módulo Bluetooth, a la adición de una placa Arduino o RaspberryPi, mejorando considerablemente las capacidades de dicho robot.

Palabras Clave: robot humanoide, estudiantes, competiciones, Arduino, RaspberryPi

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes modelos de robots humanoides de bajo coste (menos de 1000€), perfectos para ser usados como plataformas a la iniciación en la robótica: RoboNova, Kondo, Bioloid (ver Figura 1). Estas plataformas están destinadas principalmente a un uso lúdico, con lo que como consecuencia de ello, se encuentran bastante limitados en diversos aspectos, como el lenguaje de programación, sensorización o complejidad de algoritmos.

Figura 1: Robots de bajo coste (izq. - dcha.): RoboNova, Kondo [5], Bioloid [8].

Así pues, ese enfoque lúdico y un precio asequible, tanto de compra como de mantenimiento, ha propiciado que muchos grupos de investigación los incorporen en ciertas asignaturas de grado (inteligencia artificial, robótica, mecatrónica o automática). Cabe mencionar que otro de los usos para dichos robots, son las competiciones, como por ejemplo, el concurso CEABOT que tiene lugar desde el año 2006 junto a las Jornadas Nacionales de Automática organizadas por el Comité Español de Automática (CEA).

2 ROBONOVA, UNA PLATAFORMA DE BAJO COSTE

2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Uno de los robots con más éxito en esta categoría, ha sido el robot RoboNova (figura 2), fabricado por Hitec. Aunque actualmente ya no se fabrica, en el momento de salir al mercado (año 2006), el coste del mismo ascendía a poco más de 800€, versión que se presentaba sin montar y sin ningún sensor.

Figura 2: Robot de bajo coste RoboNova

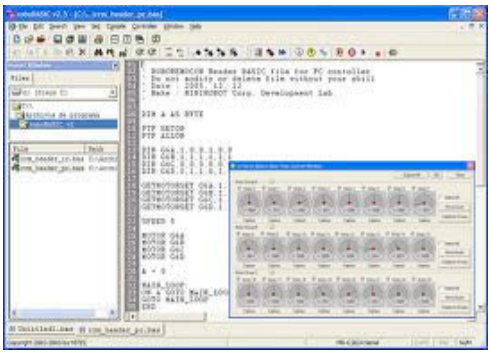
El robot RoboNova está compuesto por 16 servos digitales, controlados por una placa con un microcontrolador Atmel ATMega 128 que cuenta entre otras cosas con 40 puertos de entrada y salida digitales (para el control de servos y sensores), puerto serie, bus I2C y 8 entradas analógicas.

Se ofrecen con dos interfaces de programación: una de estilo script y otra basada en una versión de BASIC, donde se han añadido funciones básicas para el control de los servos digitales de forma individual

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

o por grupos, el acceso a las entradas analógicas o las comunicaciones por el puerto I2C.
Sin lugar a dudas, el hecho de poder programar en un lenguaje tan sencillo como es BASIC, favorece que el usuario adquiera un control del robot de forma fácil y rápida. Del mismo modo, la creación de movimientos es muy sencilla gracias al uso de una interfaz dedicada a ello (ver Figura 3). No obstante, este mismo planteamiento de facilidad de uso se vuelve en contra del usuario en el momento que se pretendan realizar tareas más complejas. Por poner algún ejemplo, no existe la posibilidad de utilizar punteros, realizar un tratamiento mínimo de cadenas, ejecutar varios hilos (esto quiere decir que el programa se ejecuta de forma monotarea) o tiene problemas con sentencias condicionales complejas.

Figura 3: RoboBasic, el entorno de programación del robot RoboNova



No obstante, algunos grupos de investigación, han conseguido reprogramar el microcontrolador, de forma que se puede cargar código escrito en C++ mediante un cross-compiler de AVR, esto supone un gran incremento en potencia de programación.

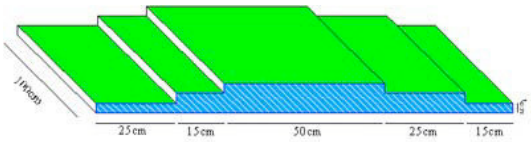
2.2 CASO DE USO I: PRIMERAS EDICIONES CEABOT

2.2.1 CEABOT: bases del concurso.

Desde el año 2006, se celebra junto a las jornadas nacionales de automática organizadas por el Comité Español de Automática, el concurso de robots humanoides CEABOT. Este concurso va dirigido a estudiantes de grado y postgrado con el fin de promocionar la robótica entre los estudiantes. La idea principal del concurso se basa en programar a los robots para que realicen cada una de las pruebas de forma totalmente autónoma, penalizando al equipo que se vea obligado a manipular el robot (ej.: tras caer al suelo). Aunque la prueba original era una competición de sumo, el comité organizador ha ido incorporando diversas pruebas. Así, hasta la pasada edición del 2013, el concurso consta de 3 pruebas:

- recorrido ida/vuelta evitando obstáculos: los robots desconocen la ubicación de los obstáculos, que son colocados por el jurado justo antes de comenzar la prueba. En caso de que los robots desplacen/tiren los obstáculos, obtendrán una penalización.
- subir y bajar una escalera: aunque la altura de los peldaños es constante y conocida, la longitud de los peldaños es variable y asimétrica. Los concursantes desconocen por que lado de la escalera deben iniciar la prueba, de esta forma se fomenta la autonomía del robot a la hora de detectar los escalones.

Figura 4: modelo de la escalera a usar en la prueba 2 del CEABOT.



- competición de sumo: los robots deberán localizar al contrincante y derribarlo para obtener puntos. Ganará el que más puntos obtenga al final del tiempo.

Como novedad, en 2014, se añade una prueba en la que interviene la visión. El robot parte del centro del campo de pruebas y debe ir localizando una serie de códigos QR que le irán guiando por el recorrido. Los detalles de la normativa se pueden consultar en la página Web del concurso CEABOT [1].

2.2.2 CEABOT: Resolución de las pruebas.

En la mayoría de los casos, los robots han participado con la configuración estándar, a la que le han añadido diversos sensores, dependiendo de la tarea a realizar. Además, hay que tener en cuenta, que la ubicación o características concretas de los sensores (como el rango del sensor infrarrojo o sónar), pueden variar dependiendo de la prueba a realizar. Sin embargo, en la mayoría de los casos, se ha usado el sensor de infrarrojos Sharp (ver Figura 5).

Figura 5: sensores usados comúnmente para el robot RoboNova. De izq. a dcha.: infrarrojos, inclinómetro, giróscopo.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el enfoque lúdico de las plataformas de robots, junto con las limitaciones del lenguaje de programación que utilizan, conlleva que los programas desarrollados para resolver las pruebas se vuelvan complejos. Esto se debe principalmente a las limitaciones software del compilador, pues en muchas ocasiones el código falla en sentencias tan comunes como saltos de rutinas, sentencias condicionales, recursividad…

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3 MEJORAS APLICADAS AL ROBONOVA: AMPLIANDO SUS FUNCIONALIDADES

Las evidentes limitaciones de la plataforma junto con la necesidad de mantener el nivel ante la creciente competitividad de los equipos participantes en el CEABOT, ha llevado a algunos grupos a extender las capacidades del robot más allá de la adición de sensores a placa base estándar.

Existen diversos tipos de mejoras aplicables a estas plataformas económicas, tanto a nivel software (reprogramar el microcontrolador), como a nivel hardware (adición de módulos específicos, placas de control, mini-FPGA, micro-PC). En las siguientes secciones vamos a centrarnos en la adición de módulos y placas, manteniendo el microcontrolador original del robot.

3.1 CONEXIÓN ROBOT-PC USANDO BLUETOOH

Hitec dispone de un módulo Bluetooth compatible con el robot RoboNova. La instalación en el robot es sumamente sencilla, pues tan sólo tenemos que conectar los cables de alimentación (GND y 5V) y los de envío/recepción (ETX y ER), situados en la parte superior izquierda de la placa de control del robot. Tras configurar el módulo usando el software que se suministra, podremos conectar un PC, vía Bluetooth, al módulo. Cabe indicar que tras realizar diversas pruebas con distintos módulos del mismo modelo, se descubrió la existencia de un buffer interno que no permite la recepción de más de 5 caracteres. En caso de sobrepasar dicho límite, se perderán los restantes.

Las modificaciones software a realizar son mínimas, pues tan sólo hay que utilizar las funciones *ERX* y *ETX*, tal y como se indica en el manual de referencia de programación. Con el comando ERX podemos guardar en una variable el byte recibido, mientras que con ETX, enviamos el valor de una variable según los baudios especificados.

Figura 6: módulo Bluetooth con un mando opcional, que puede usarse para controlar el robot.

Este módulo nos permite escribir un programa que reciba comandos, en forma de caracteres, los ejecute y devuelva un resultado. De esta forma podemos extraer el bucle de control fuera del programa del robot y realizar la toma de decisiones sin las limitaciones del entorno de programación del ROBONOVA.

3.1.1 Caso de uso: JAVA-Server

Una vez preparado el robot para la recepción de comandos mediante caracteres alfanuméricos, se desarrolló una web y un servidor web en JAVA [9] para poder tele-controlar el robot a través de Internet. La web consta de dos partes: una parte para mostrar las imágenes de una cámara inalámbrica colocada en un sistema pan-tilt que emula la cabeza del robot; y otra parte, con un listado con las acciones que el robot puede ejecutar (F, Forward walk; R, Right shift; etc.). De este modo, el usuario escribe en una caja de texto los comandos que debe realizar el robot, mientas que el servidor JAVA se encarga de formar paquetes con 5 caracteres a enviar al robot, y recibir la información que llegue del robot. Las peticiones de ejecución de comandos pueden ser enviadas al robot mediante la página web o a través de una petición HTTP que contenga la cadena de caracteres con los comandos e enviar. Este sistema sirvió de base para desarrollar el proyecto RoboEvolutive.

3.1.2 Caso de uso: RoboEvolutive

Uno de los principales problemas del robot RoboNova es la dificultad de caminar en línea recta. La desviación que genera el robot parece totalmente aleatoria, aunque en muchas ocasiones viene inducida por diversos motivos (mal ajuste de la tornillería de las piernas, estado de la batería, desgaste de los servos, el material y rugosidad del suelo, etc.).

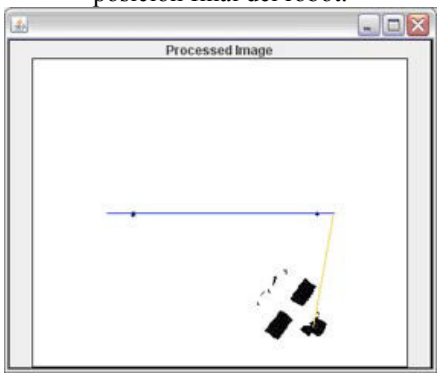
El proyecto RoboEvolutive tenía como principal motivación, encontrar una cadena de comandos (instrucciones de movimientos) para que el robot llegase desde el punto de partida hasta el punto final, de la forma más recta posible. Para ello, se desarrolló un algoritmo genético-evolutivo [2][3] que crea 10 cadenas de comandos por generación, y que se envían al robot para su ejecución. Cuando el robot finaliza la ejecución de cada una de las cadenas, emite un sonido para indicar que ha finalizado la ejecución, se calcula el error y se vuelve a colocar el robot en el punto de partida.

El error se calcula como la distancia en píxeles desde donde ha acabado el robot hasta el punto final establecido (ver línea amarilla de la Figura 7). Para poder calcularlo, las pruebas se realizan en un entorno estructurado, con un suelo negro, una iluminación constante y una cámara en el techo monitorizando el robot. Así mismo, se han colocado unas etiquetas blancas sobre el robot para poder segmentarlo del entorno. Si el robot se sale de la zona

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de visión o se cae, el programa penaliza considerablemente el error de esa ejecución.

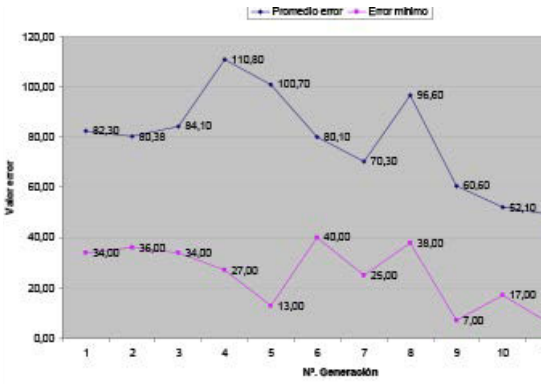
Figura 7: captura de pantalla donde se muestra la posición final del robot.



Tras ejecutar todas las cadenas de una generación, se mantienen las 3 mejores cadenas (las que tienen un menor error) y se descarta el resto. A partir de esas 3 cadenas, se producen 7 nuevas cadenas con mutaciones aleatorias (esto es, variaciones de dicha cadena), y se repite el proceso. Tras 10 generaciones, concluye el programa.

Con respecto a los resultados obtenidos, en la Figura 8 se puede apreciar como tanto el error medio como el error mínimo de cada iteración, disminuye. Tal y como se ha mencionado anteriormente, las caídas o salidas del campo quedan penalizados con un valor muy alto, es por eso que aparecen picos de error en los resultados. Por ejemplo, en la 4ª generación, el error mínimo continúa en descenso, mientras que el error promedio es bastante más alto, como consecuencia de una caída del robot.

Figura 8: error medio en píxeles (línea azul) y mínimo (línea rosa) en cada iteración.



Como conclusión, podemos afirmar que con este proyecto se ha validado de forma exhaustiva el uso y robustez tanto del servidor JAVA, como del programa usado en el propio robot. Lamentablemente, el módulo Bluetooth se vuelve inestable y se desconecta cuando la batería del robot está descargada.

3.2 CONEXIÓN ROBOT-ARDUINO

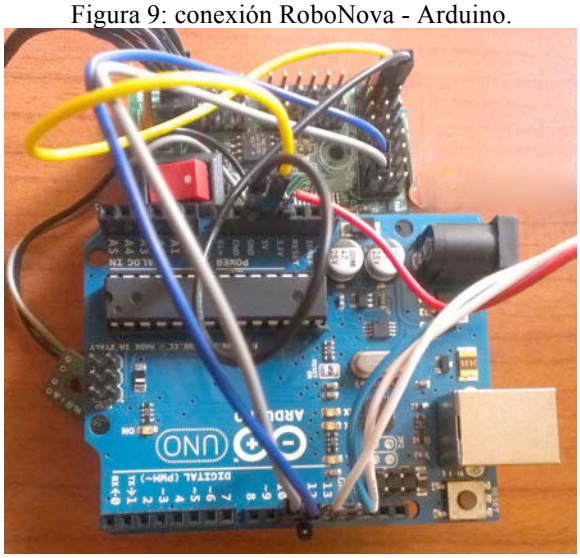
Si bien con el uso del módulo Bluetooth, aumentan las posibilidades de control que se tiene sobre el robot, el uso de los sensores sigue siendo muy limitado. Este problema es considerablemente importante, ya que, por ejemplo, no se puede caminar y comprobar los valores de los sensores. Otro de los problemas que presentan la mayoría de estas placas, es el bajo rendimiento en general cuando se realizan operaciones matemáticas.

Así pues, a fin de mejorar estos dos aspectos, se ha usado una placa Arduino, conectada a la placa base del robot mediante una conexión serie. Arduino [4] es una plataforma multipropósito de hardware libre con múltiples entradas analógicas y digitales, y cuya programación se realiza en C++.

De este modo, Arduino puede ejecutar, a la vez, el programa de control, la monitorización de los sensores y la conexión con la placa del robot. Aunque Arduino no llega a ejecutar de forma completamente en paralelo todas esas tareas, sí evitamos el bloqueo que se produce en la placa base de RoboNova, pues en ella no se puede ejecutar ningún comando mientras se mueve. Con la solución propuesta, mientras la ejecución de caminar se realiza en la placa del RoboNova, Arduino puede realizar las comprobaciones de sensores y continuar con el algoritmo principal, manteniéndose a la espera para enviar al robot la siguiente instrucción.

La conexión entre ambos dispositivos, robot y Arduino, se realiza usando los puertos TTL (ver Figura 9). Dado que la comunicación entre el Arduino y la placa del robot es directa, eliminamos el problema de estabilidad del módulo Bluetooth mencionado en el apartado 3.1.2.

Figura 9: conexión RoboNova - Arduino.

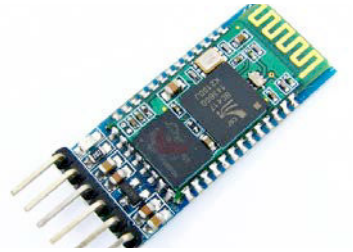


ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.2.1 Caso de uso: control del robot mediante un móvil Android

Aunque el robot RoboNova se puede teleoperar con un PC gracias al módulo Bluetooth, tal y como se ha mencionado anteriormente, la comunicación no es rápida ni fiable por los problemas ya mencionados. A fin de solucionar estos problemas, conectamos un módulo Bluetooth (marca-modelo: HC-05) a la placa Arduino, y ésta al robot tal y como se ha descrito en el apartado anterior. De esta forma es Arduino el que gestiona el enlace inalámbrico, proporcionando una comunicación fiable y estable.

Figura 10: módulo Bluetooth compatible con Arduino



En cuanto a la programación en Android, se ha usado el ADT de Eclipse, creando una interfaz sencilla para el control del robot a modo de mando a distancia, centrándose inicialmente, en la movilidad típica (hacia delante, hacia atrás, hacia los lados). La interfaz consta de tres secciones principales:

- Búsqueda de dispositivos: sirve para buscar posibles robots a conectarse.
- Conectar/Desconectar: haciendo referencia al último dispositivo conectado.
- Botones direccionales.

La arquitectura planetada en este proyecto, sigue el mismo esquema que el servidor JAVA. El código del RoboNova, quedará a la espera de la recepción de un carácter alfanumérico. Tras la recepción, realizará la acción asociada y enviará un mensaje de finalización.

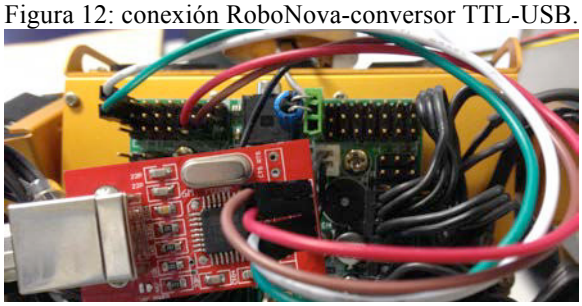
Figura 11: conexiones RoboNova-Android

3.3 CONEXIÓN ROBOT-RASPBERRY PI

Si bien la conexión RoboNova – Arduino amplía las posibilidades, siguen habiendo ciertas limitaciones: el sistema sigue estando bastante limitado con respecto a las capacidades reales de multitarea y conexión con más dispositivos.

Así pues, el siguiente nivel de mejora planteado incluye la conexión con una placa RaspberryPi [6], que se trata de un mini-PC de bajo coste cuyo objetivo inicial es acercar el estudio de ciencias de la computación en los colegios. La principal diferencia con respecto a la plataforma Arduino, es que ésta es un microcontrolador programable, mientras que RaspberryPi es un mini-PC, con las principales ventajas que ello conlleva, como son la mayor potencia de cálculo, la flexibilidad de un sistema operativo convencional y libertad para elegir el lenguaje de programación. Existen diversas versiones de Linux que funcionan para RaspberryPi, aunque la más conocida y utilizada es Raspbian (una versión de Debian) [7]. Para conectar ambos dispositivos, se ha usado un conversor TTL-serie-USB (ver Figura 12), con lo que para acceder al robot deberemos usar el puerto "ttyUSB" creado.

Figura 12: conexión RoboNova-conversor TTL-USB.



3.3.1 Caso de uso: uso de una cámara de vídeo.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la principal ventaja que aporta el uso de la plataforma RaspberryPi, es que en realidad es un mini-PC. Así, se pueden usar cámaras de vídeo de diferentes tipos, desde el módulo original de RaspberryPi (ver Figura 12), a multitud de webcams compatibles con Linux. En nuestro caso, se han probado dos cámaras diferentes: el módulo original de RaspberryPi y la mini-cámara IDS-XS. La integración de ambas cámaras ha resultado bastante sencillo, pues la cámara oficial tan sólo necesita activar una entrada en el menú de configuración e instalar una librería en Python; mientras que para la cámara de IDS, el fabricante ofrece en su web una imagen de Raspbian con los drivers ya instalados. Así mismo, en la web del fabricante hay suficiente información del SDK, que permite el desarrollo de aplicaciones que hagan uso de la cámara.

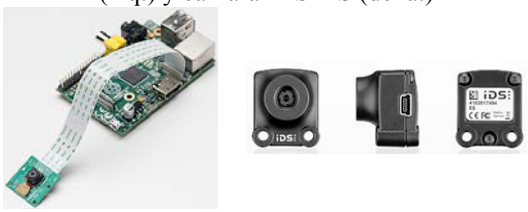
Las características de ambas cámaras son:

	IDS-XS	RaspberryPi Cam
Sensor	CMOS	CMOS
Resolución	2592 x 1944	2592 x 1944
Interface	USB2	Cinta 15 pines
Dimensiones H/W/L (mm)	26.5 x 23 x 21.5	20 x 25 x 10

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Esta ultima modificación del robot esta motivada por la nueva prueba incluida en la edición del CEABOT 2014 que requiere de visión para detectar un código QR. Esta mejora abre un abanico de nuevas posibilidades que acercan las plataformas de bajo coste a los mini-robots humanoides más avanzados (e.g NAO, Darwin).

Figura 13: detalles de la cámara oficial RaspberryPi (izq.) y cámara IDS-XS (dcha.)



4 CONCLUSIONES

En el presente artículo se muestra el uso y mejoras aplicadas a una de las plataformas de robots humanoides de bajo coste, el robot RoboNova.

Tras una primera fase de mejoras software, se decidió probar las mejoras hardware, centradas principalmente, en la conexión de la placa base del robot con otro dispositivo, delegando en ésta, la ejecución de las tareas de locomoción.

Dichas mejoras hardware se centran en dos niveles de conexión a la placa de control del robot: vía puerto serie o través de un módulo Bluetooth. Además, se ha pasado el control de la ejecución a un PC externo (caso de uso del proyecto RoboEvolutive), una placa Arduino (para un control básico) o un mini-PC (para un control más avanzado, con el que se pueden utilizar cámaras de video o sensores más avanzados).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, DPI2011-27977-C03 (proyecto TRITON), por la Fundación Caixa Castelló-Bancaixa, proyecto PI·1B2011-17, por la Universitat Jaume I gracias a la beca FPI PREDOC/2010/23 y por el Ministerio de Economía y Competitividad gracias a la beca BES-2012-054455.

Referencias

[1] CEABOT 2014. Mayo 2014. http://www.ceautomatica.es/og/robotica/concurso-ceabot

[2] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley. 1989

[3] H. P. Schwefel. Evolution Strategies: A family of non-linear optimization techniques based on imitating some principles of organic evolution. Annals of Operational Research, Vol.1, 1984

[4] http://www.arduino.cc

[5] http://www.kondo-robot.com/

[6] http://www.raspberrypi.org

[7] http://www.raspbian.org

[8] http://www.robotis.com/xe/bioloid_en

[9] Juan C. García, Pedro J. Sanz, Enric Cervera. Using Humanoids for Teaching Robotics and Artificial Intelligence Issues. The UJI Case Study. Robot 2011, Sevilla. 2011.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Obtención de los estados de equilibrio de un sistema desconocido mediante su modelado borroso

Antonio Javier Barragán Piña, Francisca Segura Manzano,
Miguel Ángel Martínez Bohórquez, José Manuel Andújar Márquez
{antonio.barragan, francisca.segura, bohorquez, andujar}@diesia.uhu.es

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva

Resumen

Tener la capacidad para analizar un sistema desde un punto de vista dinámico puede ser muy útil en muchas circunstancias (sistemas industriales, biológicos, económicos, ...). Existen multitud de técnicas que permiten analizar sistemas dinámicos tanto continuos como discretos, pero es necesario poseer un modelo de la planta para realizar este análisis. En este artículo se plantea el análisis dinámico de un sistema desconocido a través de la obtención de un modelo borroso tipo Takagi-Sugeno (TS) a partir de datos de entrada-salida del mismo.

Palabras clave: Análisis, control, dinámica, estados de equilibrio, modelado.

1 Introducción

El análisis dinámico de un sistema permite conocer su comportamiento y la respuesta que el mismo presentará a distintos estímulos de entrada. Si el sistema es desconocido o su dinámica es lo suficientemente compleja como para no poder obtener un modelo matemático del mismo [18], en principio no sería posible realizar un análisis dinámico formal del sistema.

Si no se posee un modelo matemático bien sea por desconocimiento del funcionamiento interno del sistema, o por la excesiva complejidad del mismo, se puede generar un modelo en base a datos de entrada-salida del sistema y, a partir de este modelo, estudiar la dinámica del sistema original.

La lógica borrosa es una herramienta que permite modelar sistemas altamente no lineales a partir de datos de entrada-salida. En concreto, los sistemas TS son aproximadores universales tanto de la función [15, 24] como de su derivada [16, 19]. Por lo tanto, aunque el sistema sea desconocido, es factible obtener un modelo borroso del mismo. Un modelo borroso es un modelo matemático formalmente hablando, así pues, a partir de este modelo es posible estudiar aspectos de la dinámica del sistema real siempre que su precisión sea suficiente. Esta forma de abordar el problema permite enfrentarse a sistemas no lineales y de difícil modelización por técnicas matemáticas usuales.

En este artículo se muestra cómo es posible analizar un sistema altamente no lineal inicialmente desconocido a partir de un modelo borroso TS, empleando para ellos técnicas ya conocidas por la comunidad científica. Para ello el artículo está organizado en las siguientes secciones: en la sección 2 se introduce al lector en la formulación del problema y se presentan las ecuaciones que se utilizarán para la representación del modelo del sistema. Posteriormente, en la sección 3 se plantea una propuesta de procedimiento para el análisis de la planta para, en la sección 4 aplicar dicho procedimiento a un ejemplo altamente no lineal. Finalmente se presentan algunas conclusiones.

2 Formulación del problema

Sea n el orden del sistema y m su número de entradas, un modelo TS equivalente de un sistema continuo puede ser representado por [5, 22, 8, 9, 21]:

$$\begin{array}{rl} R^{(l,i)}: & \text{Si } x_1 \text{ es } A^l_{1i} \text{ y } \ldots \text{ y } x_n \text{ es } A^l_{ni} \\ & \text{y } u_1 \text{ es } B^l_{1i} \text{ y } \ldots \text{ y } u_m \text{ es } B^l_{mi} \\ & \text{Entonces } \dot{x}^l_i = \sum_{k=0}^{n} a^l_{ki}\tilde{x}_k + \sum_{j=1}^{m} b^l_{ji}u_j, \end{array} \quad (1)$$

donde $l = 1..M_i$ es el índice de la regla y M_i el número de reglas que modelan la i-ésima ecuación diferencial del proceso, $\dot{x}_i$. $\tilde{x}_k$ es la (-ésimak) coordenada del vector de estado extendido [2, 5] $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n)^{\mathrm{T}} = (1, x_1, \ldots, x_n)^{\mathrm{T}}$.

De esta forma, la salida del modelo borroso puede calcularse a través de la expresión [23, 25]:

$$\dot{x}_i = \sum_{k=0}^{n} a_{ki}\tilde{x}_k + \sum_{j=1}^{m} b_{ji}u_j, \quad (2)$$

siendo $a_{ki}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ y $b_{ji}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ coeficientes variables [26] definidos por:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$a_{ki}(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \frac{\sum_{l=1}^{M_i} w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u}) a_{ki}^l}{\sum_{l=1}^{M_i} w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u})} \quad (3)$$

$$b_{ji}(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \frac{\sum_{l=1}^{M_i} w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u}) b_{ji}^l}{\sum_{l=1}^{M_i} w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u})} \quad (4)$$

donde la variable $w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u})$ representa el grado de activación de las reglas de la planta, y los vectores $\boldsymbol{\sigma}_i^l$ y $\boldsymbol{\alpha}_i^l$ representan los conjuntos de parámetros adaptables de los antecedentes de las reglas de la planta en los universos de discurso de las variables de estado y las señales de control, respectivamente.

$$w_i^l(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \prod_{k=1}^{n} \mu_{ki}^l(x_k, \boldsymbol{\sigma}_{ki}^l) \prod_{j=1}^{m} \mu_{ji}^l(u_j, \boldsymbol{\alpha}_{ji}^l) \quad (5)$$

3 Procedimiento de análisis

En primer lugar se ha de obtener un modelo TS de la planta a analizar mediante alguna de las muchas técnicas de modelado existentes [4], ya sea en línea [10, 1], o fuera de línea [13, 14, 8, 6, 7, 12]. A continuación es importante localizar los estados de equilibrio del sistema. Para el caso de los sistemas borrosos, y dada la inherente capacidad de este tipo de modelos para representar dinámicas no lineales, se hace necesaria la utilización de métodos numéricos capaces de resolver el sistema de ecuaciones no lineales que se plantea:

$$\dot{x}_i = 0 = \sum_{k=0}^{n} a_{ki}\tilde{x}_k + \sum_{j=1}^{m} b_{ji}u_j, \forall i = 1..n \quad (6)$$

En el análisis de los sistemas dinámicos no lineales, el cálculo de los estados de equilibrio del sistema puede convertirse en un problema de envergadura. A diferencia de los sistemas lineales que tienen uno o infinitos estados de equilibrio, un sistema no lineal puede tener uno, ninguno, cualquier número finito o infinitos estados de equilibrio. En este trabajo se propone emplear métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones no lineales (6), concretamente el método de Levenberg-Marquardt [17, 20]. Este algoritmo requiere de un punto inicial para comenzar la búsqueda. Con objeto de maximizar las posibilidades de encontrar todos los estados de equilibrio existentes, se procederá a inicializar el algoritmo mediante un barrido de puntos a lo largo de todo el universo de discurso tanto de las variables de estado como de las variables de entrada del sistema. El funcionamiento interno del algoritmo de Levenberg-Marquardt requiere del uso de la matriz Jacobiana del sistema, la cual puede aproximarse o calcularse de forma explícita para mejorar la convergencia. El cálculo de la matriz jacobiana de un modelo borroso TS está resuelto de forma general en [2, 5, 3], por lo que puede incluirse en el algoritmo numérico para mejorar su precisión y velocidad de convergencia.

La misma matriz jacobiana empleada para la resolución de los estados de equilibrio puede emplearse para linealizar el sistema en cada una de las soluciones obtenidas. De esta forma también es posible estudiar las características de los estados de equilibrio encontrados a partir de los autovalores de la matriz dinámica del sistema linealizado. Este análisis puede ayudar a comprender la dinámica del sistema, su estabilidad local, y, a los ojos de un experto, incluso se pueden observar comportamientos más complejos como bifurcaciones o ciclos límite.

4 Ejemplo. Circuito con diodo túnel

Sea el circuito diodo-túnel mostrado en la figura 1, donde $R = 1.5$ kΩ, $C = 2$ pF y $L = 5$ μH, $x_1(t) = v_C(t)$, $x_2(t) = i_L(t)$ son las variables de estado del sistema, y $h(v)$ la característica $v_D - i_D$ no lineal del diodo-túnel mostrada en la figura 2 [11].

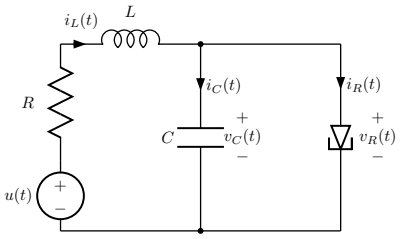


Figura 1: Circuito diodo túnel.

Suponiendo desconocida la dinámica del sistema, el procedimiento a seguir es obtener un modelo borroso del sistema a partir de datos de entrada-salida, y analizar a continuación dicho modelo con objeto de extraer conclusiones sobre la dinámica del sistema.

Para modelar el sistema se ha empleado el algoritmo neuroborroso ANFIS [14] a partir de un conjunto de 1000 datos distribuidos uniformemente en el universo de discurso $x_1(t) \in [0,1]$, $x_2(t) \in [0,2]$ y $u(t) \in [0,2]$. Se han generado 68 reglas para el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

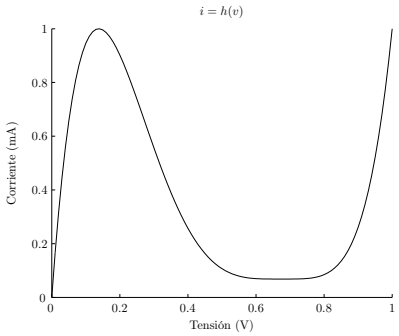


Figura 2: Característica V-I del diodo túnel.

modelado de $\dot{x}_1(t)$ y 2 reglas para $\dot{x}_2(t)$, obteniéndose unos errores cuadráticos medios (MSE) de $0.006\ V/ns$ y $1.24\times10^{-9}\ mA/ns$, respectivamente.

A continuación se ha empleado el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt [17, 20] para buscar las soluciones al sistemas de ecuaciones planteado en (6). Para ello se ha partido de una malla de puntos iniciales con un incremento de 0.05, y cuyos límites coinciden con el universo de discurso de cada una de las variables del sistema. En la figura 3 se muestran las soluciones del sistema real junto con las soluciones obtenidas por el algoritmo numérico sobre el modelo borroso, descartando aquellas que se sitúan fuera del universo de discurso por carecer de validez.

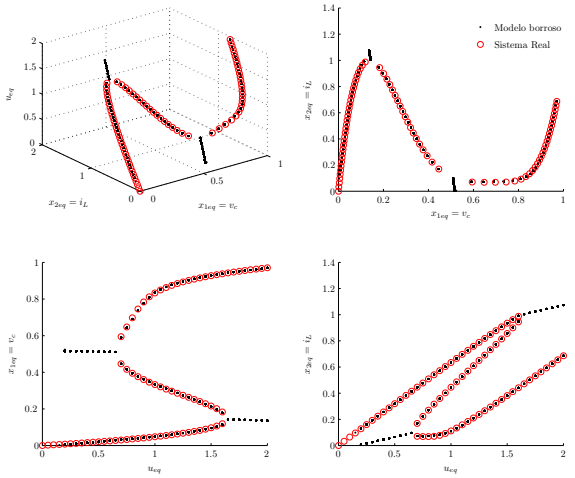


Figura 3: Estados de equilibrio localizados dentro del universo de discurso del modelo borroso.

En la figura 4 se muestran los autovalores correspondientes al sistema linealizado en los estados de equilibrio localizados por el algoritmo numérico. Dichos autovalores se han calculado a partir de la linealización del modelo borroso presentada en [3].

Observando los resultados presentados anteriormente, se puede comprobar que es posible obtener una gran cantidad de información sobre un sistema desconocido a partir de un modelo borroso del mismo, por ejemplo la existencia de múltiples estados de equilibrio o la aparición de bifurcaciones relacionadas con su número. Tanto la localización aproximada de los estados de equilibrio, como sus comportamientos locales derivados de los autovalores del sistema linealizado, proporcionan una idea general del comportamiento del sistema en un amplio rango de funcionamiento, y puede ayudar al ingeniero de control a interpretar el comportamiento del sistema real e incluso ayudarlo a decidir sobre la estrategia de control a aplicar. Evidentemente, los resultados serán más fiables cuanto menor sea el error del modelo obtenido, y pueden ser completamente erróneos si los errores de modelado son excesivos. En el ejemplo presentado puede observarse como el modelo borroso genera estados de equilibrios que no existen en el sistema real. La existencia de estos errores debe ser tenida en cuenta a la hora de analizar un sistema realmente desconocido, para no realizar interpretaciones erróneas sobre el funcionamiento del sistema.

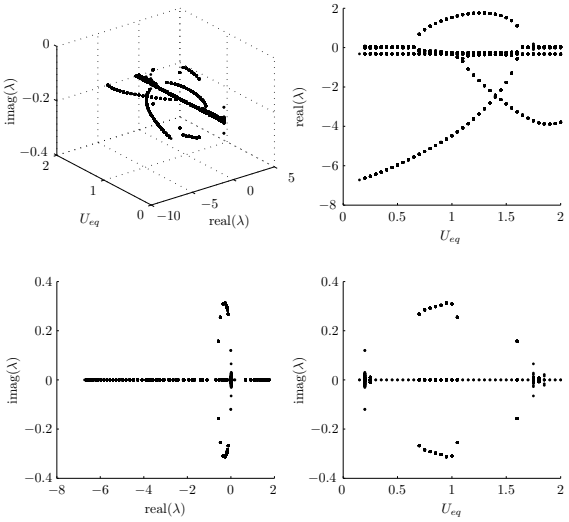


Figura 4: Autovalores de los estados de equilibrio localizados.

5 Conclusiones

En este artículo se ha planteado el análisis dinámico de un sistema desconocido a través de la obtención de un modelo borroso tipo Takagi-Sugeno (TS) a partir de datos de entrada-salida del mismo. Se ha demostrado mediante un ejemplo de un sistema altamente no lineal cómo se puede extraer información muy valiosa analizando el modelo borroso, como la localización de los estados de equilibrio o su comportamiento local.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Agradecimientos

Este artículo es una contribución del proyecto de los proyectos DPI2010-17123, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y TEP-6124, financiado por la Junta de Andalucía; ambos proyectos cofinanciados con fondos FEDER.

Referencias

[1] Basil Mohammed Al-Hadithi, Agustín Jiménez Avello, and Fernando Matía. New methods for the estimation of Takagi–Sugeno model based extended Kalman filter and its applications to optimal control for nonlinear systems. *Optimal Control Applications and Methods*, 33(5):552–575, September 2012.

[2] José Manuel Andújar and Antonio Javier Barragán. A methodology to design stable nonlinear fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 154(2):157–181, September 2005.

[3] José Manuel Andújar and Antonio Javier Barragán. A formal methodology for the analysis and design of nonlinear fuzzy control systems. In *Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on*, number 1, pages 66–74, Barcelona, Spain, July 2010.

[4] José Manuel Andújar and Antonio Javier Barragán. Hybridization of fuzzy systems for modeling and control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial {RIAI}*, 11(2):127–141, April 2014.

[5] José Manuel Andújar, Antonio Javier Barragán, and Manuel Emilio Gegúndez. A general and formal methodology for designing stable nonlinear fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(5):1081–1091, October 2009.

[6] Plamen Angelov and Richard Buswell. Identification of evolving fuzzy rule-based models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10(5):667–677, October 2002.

[7] Plamen P. Angelov and Dimitar P. Filev. An approach to online identification of Takagi–Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 34(1):484–498, February 2004.

[8] Robert Babuška. Fuzzy modeling – a control engineering perspective. In *Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95*, volume 4, pages 1897–1902, Yokohama, Japan, March 1995.

[9] Robert Babuška and H. B. Verbruggen. A new identification method for linguistic fuzzy models. In *Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95*, volume 4, pages 905–912, Yokohama, Japan, March 1995.

[10] Antonio Javier Barragán, Basil Mohammed Al-Hadithi, Agustín Jiménez, and José Manuel Andújar. A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended kalman filter. *Applied Soft Computing*, 18(0):277—289, May 2014.

[11] Leon O. Chua, Charles A. Desoer, and Ernest S. Kuh. *Linear and nonlinear circuits*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Circuits and systems. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.

[12] Mouloud Azzedine Denaï, Frank Palis, and Abdelhafid H. Zeghbib. Modeling and control of non-linear systems using soft computing techniques. *Applied Soft Computing*, 7(3):728–738, June 2007.

[13] Shin-Ichi Horikawa, Takeshi Furuhashi, and Yoshiki Uchikawa. On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the backpropagation algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3(5):801–806, September 1992.

[14] Jyh-Shing Roger Jang. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3):665–685, May 1993.

[15] Bart Kosko. Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Transactions on Computers*, 43(11):1329–1333, November 1994.

[16] Vladik Kreinovich, Hung T. Hguyen, and Yeung Yam. Fuzzy systems are universal approximators for a smooth function and its derivatives. *International journal of Intelligent Systems*, 15(6):565–574, June 2000.

[17] K. Levenberg. A method for the solution of certain problems in least squares. In *Quart. Appl. Math.*, volume 2, pages 164–168, 1944.

[18] María J. López-Baldán, Alfonso García-Cerezo, José M. Cejudo, and A. Romero. Fuzzy modeling of a thermal solar plant. *International Journal of Intelligent Systems*, 17(4):369–379, April 2002.

[19] Arianna Mencattini, Marcello Salmeri, and Adelio Salsano. Sufficient conditions to impose derivative constraints on MISO Takagi–Sugeno fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 13(4):454–467, August 2005.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[20] Jorge J. Moré. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In G.A. Watson, editor, *Numerical Analysis*, pages 105–116. Springer Verlag, Berlin, 1977.

[21] Hung T. Nguyen, Michio Sugeno, Richard M. Tong, and Ronald R. Yager. *Theoretical aspects of fuzzy control*. John Wiley Sons, New York, NY, USA, 1995.

[22] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1):116–132, 1985.

[23] L. X. Wang. *Adaptive fuzzy systems and control*. Prentice Hall, New Jersey, 1994.

[24] Li-Xin Wang. Fuzzy systems are universal approximators. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1163–1170, San Diego, CA, USA, 1992.

[25] Li-Xin Wang. *A course in fuzzy systems and control*. Prentice Hall, New Yersey, USA, 1997.

[26] L.K. Wong, F.H.F. Leung, and P.K.S. Tam. Stability design of TS model based fuzzy systems. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, volume 1, pages 83–86, Barcelona, Spain, July 1997.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SUPERVISIÓN, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN MULTI-ETAPA

Mario L. Ruz, Sergio Fragoso, David Rodríguez, Francisco Vázquez
Dpto. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba
mario.ruz@uco.es, p52frhes@uco.es, in1rocar@uco.es, fvazquez@uco.es

Miguel Zamora
CIAT, Departamento de I+D+I, mzamora@grupociat.es

Resumen

En este trabajo se ha implementado un esquema de red para un sistema de climatización formado por varias etapas de producción. El esquema de red diseñado contempla diferentes protocolos presentes en la Gestión Técnica de Edificios (GTE), como LonWorks, Modbus y TCP/IP. Se ha planteado una arquitectura de red ampliable y flexible, siendo posible de este modo añadir nuevas etapas de forma sencilla, o ampliar las capacidades de supervisión y monitorización, como por ejemplo un acceso a las variables del sistema a través de un servidor web. En el artículo se muestran las posibilidades que ofrece la arquitectura de red planteada, haciéndose especial hincapié en las capacidades de control y supervisión de sistemas de climatización en edificios residenciales o centros comerciales, incluyéndose la gestión de horarios, alarmas, o mecanismos automáticos de emergencia. Por último, se muestran algunos resultados de aplicación del esquema de red propuesto, y que se ha integrado en una en una instalación experimental en la Universidad de Córdoba.

Palabras Clave: Gestión Técnica de Edificios, climatización, arquitectura de red, supervisión, control.

1 INTRODUCCIÓN

Los edificios constituyen uno de los principales consumidores de energía en muchos países, con casi el 40% del consumo de la energía total. Casi el 50% de ese consumo se debe a los sistemas de climatización (HVAC, *Heating, Ventilating and Air Conditioning*) [1]. Surge por tanto la necesidad de mejorar la eficiencia energética de edificios, y en particular, la optimización de los sistemas HVAC. Dicha optimización se fundamenta en una serie de factores, entre los cuales tiene un papel destacado el sistema de control y supervisión implementado.

En este trabajo se presenta la supervisión, monitorización y control de un sistema de climatización multi-etapa, entendiéndose en este caso el concepto de multi-etapa como la existencia de máquinas de producción en paralelo, que permiten flexibilizar y escalar la producción de frío ante una demanda determinada. El control del sistema se ha realizado de forma que éste se auto-gestione, con la mínima intervención por parte del usuario. El tratamiento de la información se ha implementado incluyendo diferentes protocolos ampliamente utilizados en la industria y en la automatización de edificios, lo que permite ampliar la red con diferentes dispositivos de un modo flexible. De esta manera, la recolección y tratamiento de datos de todos los componentes del sistema posibilita la implementación de algoritmos de control de una cierta complejidad [3], [6].

La gestión de las etapas se ha diseñado considerando dos posibilidades: a) mediante un control de capa superior: esta opción hace posible una supervisión tipo GTE, permitiendo integrar sistemas de energía, iluminación, presencia, seguridad, etc., además del propio sistema HVAC. De esta manera, las instalaciones del edificio se gestionan en función de la demanda de los usuarios o condiciones exteriores. Respecto al sistema HVAC, se incrementan las posibilidades de supervisión, donde a partir de un control de gestión alojado en un controlador programable con capacidad de servicio web se actúa sobre las demás etapas; b) a nivel de etapas: en este caso una de las máquinas se considera como maestra, y se encarga de gestionar a las demás. Esta segunda opción, aunque con menos posibilidades de ampliación que la primera, tiene un coste económico menor, y sigue siendo posible una supervisión de las variables asociadas a las etapas (temperaturas actuales y almacenamiento de éstas y otras variables en registros definidos en memoria de los propios controladores o un PC).

En las siguientes secciones se explican los diferentes aspectos del sistema implementado. En la sección 2 se plantean las ventajas que puede aportar una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

arquitectura de red como la propuesta, se comentan los protocolos de comunicación contemplados y la instalación experimental disponible en la Universidad de Córdoba, en la cual se ha integrado la red de supervisión descrita en este trabajo. En la sección 3 se describe el control por etapa, entendiéndose dicho control como la estrategia de regulación implementada en cada una de las máquinas de climatización que conforman la red. Se destacan aquí las variables que se comparten entre etapas para que éstas trabajen de un forma conjunta. En la sección 4 se describe la gestión mediante servidor web comentada anteriormente, la cual amplía las posibilidades de control y supervisión del sistema. Se describen las capacidades de almacenamiento y monitorización de datos realizadas en la instalación experimental mencionada anteriormente. Finalmente, se definen las principales conclusiones de este trabajo y se comentan algunas de las características principales que serán de utilidad en futuras aplicaciones.

2 DISEÑO DE LA RED

2.1 Planteamiento del problema

Las necesidades de ampliación de una instalación de climatización pueden deberse a diversas causas, como por ejemplo la extensión de la zona a climatizar, o a una mejora del servicio que proporciona el sistema, tales como una respuesta más rápida ante variaciones de la carga térmica (que puede estimarse mediante algún tipo de sensor [2]), la mejora en la eficiencia energética de la instalación, o la capacidad de reacción ante el fallo de alguna de las máquinas mediante un sistema redundante.

Ante esta casuística, y teniendo también en cuenta aspectos económicos, puede ser interesante mantener parte de la instalación inicial junto con las nuevas máquinas de climatización que se incorporen. Dependiendo de la carga térmica total (variación temperatura exterior, número de personas en una región específica, etc.) y el valor de la consigna en la zona a climatizar, puede ser suficiente que sólo un subconjunto de las máquinas se encuentre en funcionamiento. Automatizar la marcha y el paro de este conjunto de máquinas, así como gestionar y supervisar sus respectivos consumos energéticos, puede aportar información relevante para evaluar la calidad del servicio en las zonas climatizadas [1], [5].

Se necesita para ello una arquitectura de red que posibilite una comunicación entre diferentes protocolos, y que proporcione un servicio de administración relativamente simple y eficiente. En este sentido, se propone una arquitectura de red expandible y modular, donde la existencia de ciertos componentes, si bien no son esenciales, sí aportan capacidades adicionales.

2.2 Instalación experimental

Para evaluar el diseño de red propuesto, en este trabajo se ha diseñado una instalación experimental conformada por dos prototipos de refrigeración por ciclo de absorción de amoniaco-nitrato de litio [8], un sistema de energía solar térmica formado por 50 m^2 de captadores solares, y un suelo radiante por el que circula agua, cuya temperatura es la variable manipulada sobre la zona a climatizar. El sistema se ha diseñado para hacer uso de una fuente de energía renovable como es la energía solar. A través de los captadores solares se calienta un depósito de agua, utilizándose para ello un intercambiador de calor. El depósito de agua realiza la función de almacenar energía solar térmica, y por ello se encuentra debidamente aislado, para conservar su temperatura el mayor tiempo posible. Cuando dicho depósito alcanza un valor de temperatura adecuado, el sistema de refrigeración compuesto por las dos máquinas de absorción entra en funcionamiento para producir agua fría, la cual circula por el suelo radiante. Si el depósito no tiene la temperatura suficiente para que las máquinas de absorción puedan trabajar, la instalación dispone de un sistema estándar de climatización partido individual, con distribución de aire por conductos. Además, el sistema también puede funcionar en modo de calefacción, suministrándose en este caso el agua caliente de forma directa al suelo radiante. En ambos casos (modo calefacción y frío), y en esta instalación en específico, existe un control sobre la temperatura del agua que circula por el suelo radiante.

2.3 Principales elementos de la red

Como ya se ha comentado, una de las principales características consideradas este trabajo es el diseño de una arquitectura de red que se pueda modificar/ampliar de forma sencilla. Este aspecto se ha tenido en cuenta tanto a nivel hardware como software. La Figura 1 muestra un esquema general de la red diseñada.

Como se puede observar, en la zona izquierda de la figura se han contemplado módulos de entradas/salidas, y que en este caso funcionan mediante el protocolo LonWorks. Este protocolo se utiliza bastante en aplicaciones de medida de energía, registro de alarmas, distribución de datos, o sistemas de automatización en edificios [4]. Los módulos de entrada/salida permiten controlar el estado de otros elementos conectados a la red, como puede ser el sistema de iluminación o dispositivos con accionamientos de tipo todo/nada o controlables mediante salidas analógicas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Por otro lado, se dispone de centrales de medida de los principales parámetros eléctricos, y que en este caso utilizan el protocolo de comunicación Modbus, también muy presente en la actualidad para la comunicación de dispositivos industriales [7]. El uso de estos dispositivos permite conocer el consumo energético de los diferentes sistemas de climatización del edificio. Dependiendo además de las prestaciones de la unidad de medida, será posible obtener valores estadísticos de la potencia activa, reactiva, factor de potencia, junto con otras medidas de calidad de la red. El conocimiento de estas medidas, con un periodo de muestreo definido, permite gestionar el consumo de la instalación, y conocer qué zonas del edificio demandan más energía en un periodo concreto.

El bloque "Servidor web" constituye el elemento principal de gestión en la red cuando está presente. Este dispositivo es un controlador programable que incorpora un servidor web, además de integrar el hardware necesario para la comunicación mediante diferentes protocolos, como TCP/IP, LonWorks, o Modbus. En dicho bloque se implementa un control de capa superior, donde, por una parte, se generan registros de las diferentes unidades de medida, se gestiona la información de los estados de las máquinas, incluyendo datos de supervisión, perfiles de acceso de usuarios, periodos de muestreos para el envío y actualización de registros, horarios de funcionamiento y ensayos, generación automática de curvas, consignas de temperatura de las máquinas, etc. Como se observa también, la arquitectura de red está dotada de una pasarela TCP-IP/Modbus, que posibilita el control de las máquinas de climatización vía web, que en este caso disponen de controladores con comunicación mediante el protocolo Modbus. Por tanto, el servidor web permite una monitorización del sistema desde cualquier zona con acceso a internet. El tipo de comunicación de la pasarela TCP-IP/Modbus es bidireccional, lo que posibilita la modificación de variables bien desde el servidor web o mediante un protocolo propietario (zona derecha de la figura).

No obstante, tal y como se ha comentado al inicio de este documento, si bien el servidor web aporta unas capacidades de control y gestión superiores, en la arquitectura de red diseñada no es esencial. Esta situación puede ocurrir en instalaciones pequeñas y centralizadas, donde no se necesita disponer de información de un número elevado de dispositivos, y que además no se encuentran emplazados en diferentes zonas, como el caso de sensores de medida ubicados en diferentes plantas del edificio, o máquinas de climatización agrupadas en regiones relativamente alejadas. Sin embargo, la presencia del controlador con servidor web permite integrar la instalación experimental con los demás sistemas presentes en el edificio. En este caso, se ha contemplado incluirla en el sistema global de gestión de edificios del Campus Universitario de Rabanales.

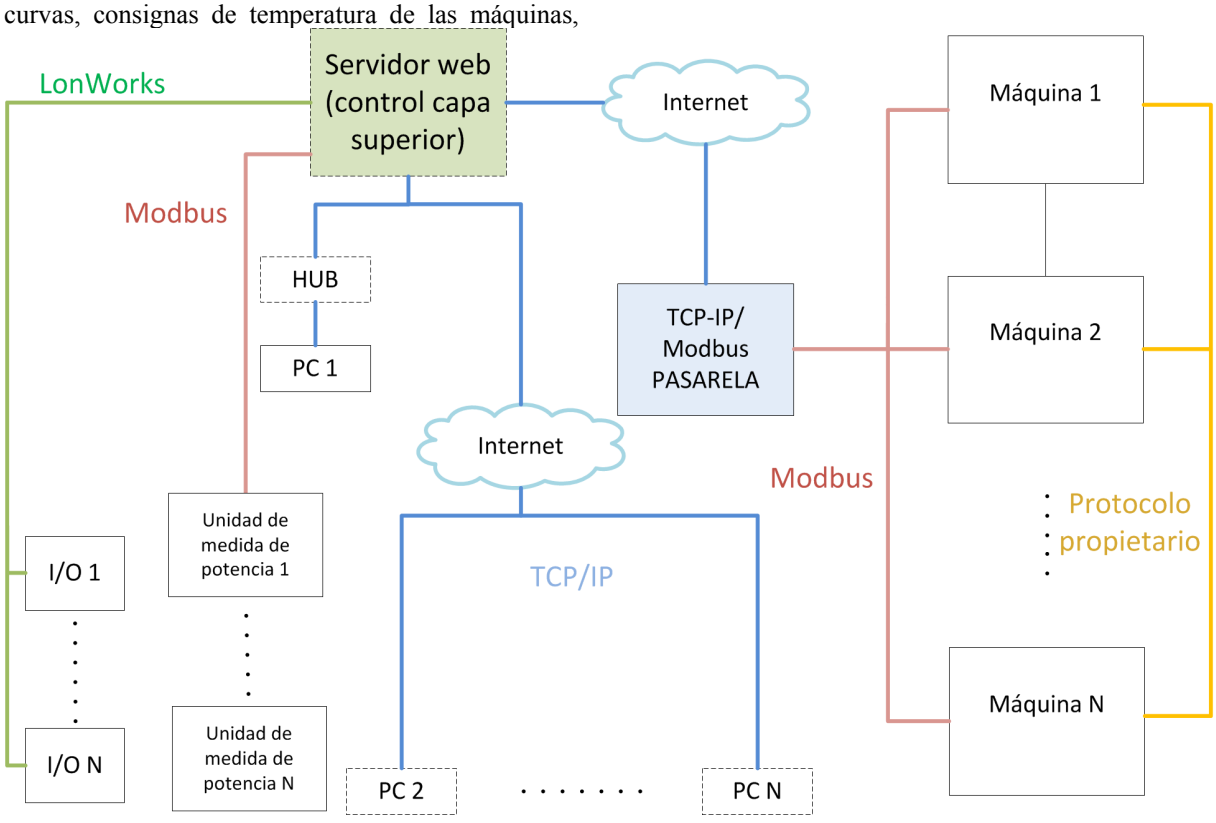


Figura 1: Arquitectura general de la red de supervisión y control diseñada

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Una supervisión vía web podría también realizarse implementando el servidor en un PC, necesitándose en este caso un conexionado directo con uno de los controladores de las máquinas, con tan solo agregar un módulo adicional a uno de los controladores de las máquinas que permita una conexión de tipo Ethernet. Aunque en este caso las posibilidades de gestión disminuyen respecto al servidor web empleado en la Figura 1 (ya que, como se ha dicho, éste dispone de entradas y salidas compatibles con los diferentes protocolos comentados), el coste de la instalación de supervisión se reduce de forma considerable, y sigue siendo posible una monitorización de las variables asociadas a las máquinas de climatización.

3 COMUNICACIÓN ENTRE ETAPAS

En esta sección se describen las características principales del control diseñado para las máquinas que componen el sistema de climatización. En primer lugar, se comentan los aspectos de mayor relevancia del control de cada máquina. En segundo lugar, se especifican las variables compartidas entre etapas, y mediante las cuales se configura el funcionamiento del sistema en modo conjunto.

3.1 Control local por etapa

Cada una de las etapas constituye una máquina de climatización de una potencia determinada. Cada máquina tiene implementada su propia regulación, y que se ha diseñado de modo que sea posible un funcionamiento totalmente autónomo, es decir, considerando una instalación mono-etapa y sin el esquema de red mostrado en la Figura 1. Para ello, también se ha instalado un display configurable, y se han programado un conjunto de menús mediante los cuales es posible modificar parámetros de configuración de cada una de las máquinas. Mediante el display instalado es posible acceder a los parámetros de todas las máquinas de climatización que conforman la red. Esto es posible debido a la comunicación entre máquinas establecida a través del "protocolo propietario" mostrado en la Figura 1, y al cual también se conecta el display.

Cada máquina tiene asignada una dirección dentro de dicho protocolo propietario. Una combinación de teclas en el display modifica la dirección a la cual éste accede. De este modo, con un único display es posible acceder a los menús correspondientes de las diferentes máquinas que se encuentran conectadas entre sí. Por ejemplo, en la Figura 2 se muestra una de las máscaras mostradas por el display, en este caso correspondiente a la máquina con la dirección 1. Se muestra su consigna de temperatura, 24 ºC, el modo de funcionamiento (frío en este caso), y la temperatura de la zona a climatizar, 22.6 ºC.

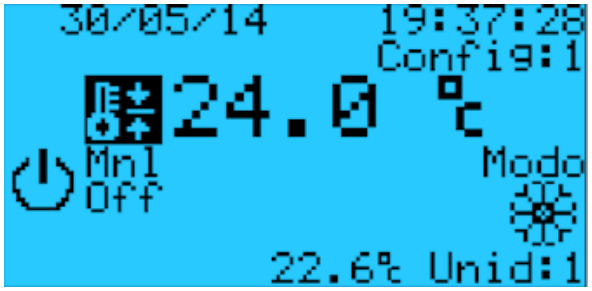


Figura 2: Pantalla inicial mostrada por el display

3.2 Entradas y salidas del controlador

El controlador de cada máquina dispone de varias entradas analógicas configurables, además de entradas y salidas digitales. Las entradas analógicas se utilizan para la toma de medidas de temperatura en las zonas de climatización, así como en diferentes valores de temperatura de la propia máquina, como por ejemplo la temperatura de impulsión y retorno del fluido utilizado como refrigerante, y cuyos valores son necesarios para la regulación de las variables a controlar. Las entradas y salidas digitales se utilizan tanto para los elementos de actuación todo/nada, como las bombas de impulsión y retorno de los diferentes circuitos de fluido, y sensores de alarma, como presostatos de alta, baja presión o sensores de caudal.

Además, los controladores de cada una de las máquinas disponen de varios puertos de comunicación. Uno de ellos se ha utilizado para la comunicación entre máquinas mediante el protocolo propietario comentado anteriormente. Otro de los puertos de comunicación se ha utilizado para el control mediante Modbus de ventiladores situados en la zona del condensador de cada máquina, y cuya función es, en términos generales, la de favorecer la transferencia de calor del refrigerante con el aire exterior. Existe además un tercer puerto que se ha utilizado para comunicar las máquinas con la pasarela TCP-IP/Modbus.

En la Figura 3 se muestra uno de los cuadros de las máquinas ubicadas en la Universidad de Córdoba, donde además se instaló la pasarela TCP-IP/Modbus mostrada en la Figura 1, junto con el cableado necesario para la conexión con el servidor web, el cual se encuentra alojado en una zona interior del edificio.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

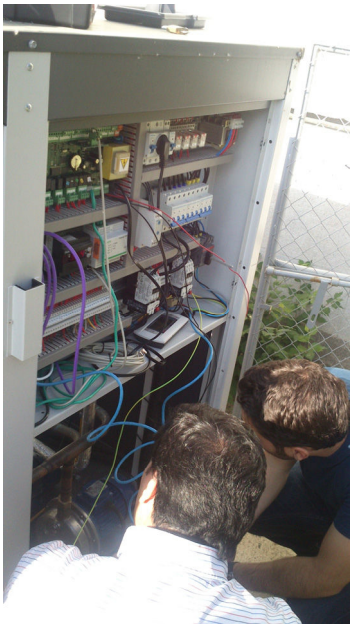


Figura 3: Instalación del cuadros en una de las máquinas

3.3 Variables compartidas entre etapas

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores, las máquinas de climatización de la instalación están comunicadas bien a través de una pasarela Modbus/TCP-IP mediante el servidor web, o bien directamente entre sí a través del protocolo propietario. Si la instalación dispone de varias máquinas, cuando éstas trabajan de forma conjunta, es necesario establecer un mecanismo de funcionamiento donde se defina la etapa correspondiente a cada máquina, y su consigna local.

Cuando el control de etapas se realiza a través del servidor web, en éste se puede programar toda la gestión de las etapas. Sin embargo, en ausencia de este equipo, una de las máquinas tiene que realizar esta tarea. Para ello, se ha considerado una de las máquinas como maestra. A partir de un conjunto de variables compartidas entre las máquinas, especificadas en la Tabla 1, se definen parámetros específicos del sistema, como el número de máquinas, la consigna de la primera etapa, etc. Además, también se ha considerado una rotación de etapas. Actualmente, la rotación de etapas se ha implementado en función del tiempo de funcionamiento de cada máquina, de modo que cuando se supera un límite de tiempo establecido por programa, se produce una reorganización automática de etapas entre máquinas. Este mecanismo permite que el tiempo de utilización de cada una de las máquinas tienda a ser similar.

Es importante resaltar que las variables mostradas en la Tabla 1 se utilizan para configurar el modo de funcionamiento del sistema. Evidentemente, todas las variables asociadas a las temperaturas, medidas de presión, alarmas, detectores de caudal, o velocidades de los ventiladores en la zona de condensación de cada máquina también se pueden configurar como accesibles mediante el servidor web.

Tabla 1: Variables compartidas entre etapas.

Variable	Descripción
N_Maquinas	Indica el número de etapas de la instalación
Etapas	Vector que contiene las direcciones de cada una de las máquinas, donde el elemento 1 contiene la dirección de la primera etapa, el elemento dos la segunda, etc.
Consigna_primera _etapa	Consigna, en ºC, correspondiente a la primera etapa
Banda	Establece la consigna de la etapa N, tomando como base la consigna de la primera etapa (ver ecuación 1)
Tiempo	Variable que indica el tiempo de funcionamiento de la máquina. Necesaria para una rotación de etapas en función del tiempo
Modo_F_C	Indica el modo de funcionamiento del sistema (frío o calefacción)
Modo_Conjunto	Indica si las máquinas funcionan de forma conjunta o de forma independiente

La variable “N_maquinas” es de tipo entero e indica el número de máquinas (etapas) de las que consta la instalación. La variable “Consigna_primera_etapa” indica el valor de la referencia impuesta por el usuario para la zona a climatizar, y a la cual se pretende que tienda la variable controlada, es decir, se trata de la referencia principal. Precisamente, a partir del valor de esta variable entran en funcionamiento las sucesivas etapas. La consigna correspondiente a la etapa N viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_N = C_1 + (Num_{etapa} - 1) \cdot banda\,, \qquad (1)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

donde C_N representa la consigna de la etapa N, C_1 la consigna de la primera etapa (y que se corresponde la variable "Consigna_primera_etapa" mostrada en la Tabla 1), Num_{etapa} indica el número de etapa asociada a una máquina en específico, y $banda$ el valor de la diferencia, en ºC, respecto a la consigna de la etapa previa. Es decir, considerando como ejemplo un sistema formado por tres etapas, una consigna de la primera etapa de 24 ºC, y una banda de 2 ºC, la segunda etapa tendrá una consigna de funcionamiento de 26 ºC, la tercera de 28 ºC, y así sucesivamente. En este ejemplo se han supuesto valores de banda iguales, independientemente de la etapa. Otra alternativa es considerar bandas diferentes según la etapa. Además, hay que tener en cuenta la banda propia interna de cada máquina, la cual establece el valor necesario de la variable controlada para que la máquina entre en funcionamiento. Por ejemplo, si una máquina tiene una consigna de 25 ºC con una banda interna de 2 ºC, entrará en funcionamiento cuando la temperatura de la zona a climatizar sea mayor de 27 ºC. Todos estos aspectos se han tenido en cuenta en la estrategia de control de las máquinas, y son modificables mediante el propio display comentado en párrafos anteriores, o mediante web.

En cualquier caso, suponiendo un sistema de etapas homogéneas (cada etapa puede suministrar la misma potencia de frío) en modo conjunto, se trabaja siempre con el menor número de máquinas posible, y las etapas entran en funcionamiento de forma secuencial. Una máquina en específico entrará en funcionamiento cuando la potencia total de las máquinas que se encuentran en marcha no es suficiente, y la temperatura de la zona a climatizar se ha desviado un valor, determinado por la ecuación (1). Considerando por ejemplo el modo frío, la máquina correspondiente a la etapa N del sistema entrará en funcionamiento cuando la temperatura de la zona a climatizar (variable controlada) supere el valor de C_N, definido en la ecuación anterior, más la banda interna de la propia máquina.

4 SUPERVISIÓN WEB

En los apartados anteriores ya se ha hecho referencia a la supervisión web implementada. La instalación de la pasarela TCP-IP/Modbus permite establecer un control y una supervisión desde el servidor web, pudiendo el usuario actuar sobre las variables que se han configurado como accesibles. El servidor web utilizado se muestra en la Figura 4.

Para el control de capa superior implementado se han utilizado además perfiles de usuario. Dichos perfiles establecen diferentes grados de actuación, desde una monitorización de las variables, lo que podría constituir un perfil informativo o público, a la posibilidad de modificar las consignas o ciertos parámetros del sistema, siendo este último perfil accesible exclusivamente a administradores de la instalación.

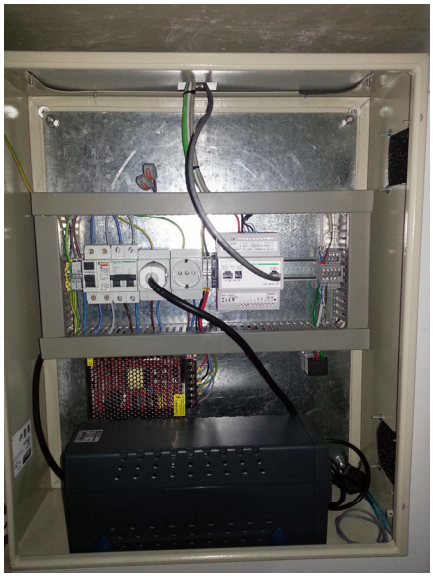


Figura 4: Servidor web alojado en el interior del edificio

En el servidor web se ha implementado la generación datos mediante tablas Excel. Como ejemplo ilustrativo, en la Figura 5 se muestra el valor de temperatura exterior registrado en un rango de siete días. El almacenamiento de esta información a lo largo de un periodo de tiempo determinado permite extraer información estadística relevante, como los valores máximos y mínimos en una estación determinada, la potencia media consumida, temperaturas de las zonas a climatizar y errores respecto a las referencias establecidas, etc. También, el servidor web se ha configurado para enviar de forma automática mensajes de correo electrónico específicos ante un evento determinado. Por ejemplo, cuando se superan ciertos valores de temperatura o la activación de una alarma determinada en alguna de las máquinas.

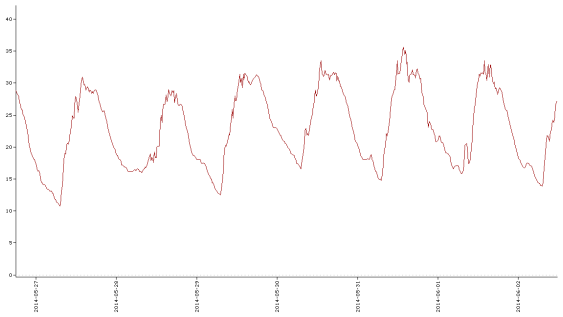


Figura 5: Temperatura exterior (acceso vía web)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una arquitectura de red de supervisión, monitorización y control para sistemas de climatización orientados a edificios tanto residenciales como de oficina, así como centros comerciales.

En la arquitectura de red planteada se ha considerado la existencia simultánea de varios protocolos, como por ejemplo LonWorks y Modbus. Esta característica permite ampliar la red de forma sencilla, con tan solo asignar una nueva dirección al dispositivo agregado, dentro del protocolo en el que funciona. Del mismo modo, las estrategias de control implementadas en las máquinas de climatización que constituyen el sistema se han diseñado de forma que éstas puedan trabajar de manera independiente o conjunta, constituyendo en este último caso un sistema multi-etapa o multi-máquina.

Por otro lado, en la Universidad de Córdoba se ha realizado una instalación prototipo en la cual se ha integrado la arquitectura de red descrita en este trabajo. Se ha utilizado un controlador programable con servidor web integrado, y que permite el acceso externo a las variables de la instalación, además de su monitorización y control, con perfiles de acceso configurados. No obstante, en la red diseñada el servidor web no es estrictamente necesario, y se ha considerado un camino alternativo de comunicación entre máquinas mediante un protocolo propietario.

Por último, se ha configurado un registro de datos en el servidor web, que permite un análisis estadístico de la instalación a lo largo de un periodo de tiempo determinado. A partir de esta configuración, se espera realizar diversos estudios que permitan comparar el rendimiento (energético, seguimiento de referencias, etc.) de diferentes prototipos de máquinas de climatización con sistemas convencionales.

Agradecimientos

El trabajo presentado forma parte del proyecto "CALORFRIO: Desarrollo de una Tecnología de Climatización de mediana potencia a partir de calor solar y residual", que ha sido cofinanciado por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía y la Corporación Tecnológica de Andalucía, y por el Ministerio de Economía y Competitividad (DPI2012-37580-C02-01).

Referencias

[1] Aftab, M., Chau, C., Armstrong, P., (2013) "Smart Air-Conditioning control by Wireless Sensors: An Online Optimization Approach*", e-Energy'13, Proceedings of the 4th international conference on Future Energy Systems*, Berkeley, USA, pp. 225-236.

[2] Agarwal, Y., Balaji, B., Gupta, R., Lyles, J., Wei, M., Weng, T., (2010) "Occupancy-driven energy management for smart building automation", *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building - BuildSys '10*. Zurich, Switzerland, pp. 1-6.

[3] Dibley, M., Li, H., Rezgui, Y., Miles, J.,(2012) "An ontology framework for intelligent sensor-based building monitoring", *Automation in Construction*, 28, pp. 1–14.

[4] Hertel, J.W., (2001) "LONWORKS in industrial", *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, ETFA, Antibes-Juan les Pins, France, pp. 385–388.

[5] I-Hai Lin, P., Broberg, H.L., (2002) "Internet-based monitoring and controls for HVAC applications", *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(1), pp. 49–54.

[6] Katabira, K., Zhao, H., Nakagawa, Y., Shibasaki, R., (2008) "Real-Time Monitoring of People Flows and Indoor Temperature Distribution for Advanced Air-Conditioning Control", *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, China, pp. 664–668.

[7] Información referente al protocolo Modbus: Referencia web: http://www.modbus.org (último acceso 09.06.2014).

[8] Zamora, M., Bourouis, M., Vallès, M., Coronas, A., (2014) "Pre-industrial development and experimental characterization of new air-cooled and water-cooled ammonia/lithium nitrate absorption chillers", *International Journal of Refrigeration* (in press) 10.1016/j.ijrefrig.2014.06.005.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DETERMINACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE MAPAS DE COBERTURA RASANT EN LA ZONA MARÍTIMA DE CANARIAS.

J. A. Rodríguez

Escuela Técnica Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de La Laguna. C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España, jandas@ull.es

G.N. Marichal

Escuela Técnica Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de La Laguna. C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España, nicomar@ull.edu.es

C. Alonso

Escuela Técnica Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de La Laguna. C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España, nicomar@ull.edu.es

I. Padrón

Escuela Técnica Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de La Laguna. C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España, nicomar@ull.edu.es

E. Melón

Escuela Técnica Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de La Laguna. C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España, nicomar@ull.edu.es

Resumen

Este trabajo se centra en la utilización de técnicas alternativas en la determinación del posicionamiento de buques frente a las técnicas empleadas de forma más extensiva. En particular, estudia la determinación de mapas de cobertura RASANT, utilizando como datos de campo un conjunto de datos obtenidos en la Zona Marítima de Canarias y aplicando un esquema neuro-fuzzy genético a la determinación de puntos de cobertura próximos a los valores medidos. En el estudio se realizan varios ensayos y se pone de manifiesto la utilidad de estas técnicas al objeto de mejorar la planificación de rutas, al poder determinar la cobertura RASANT en zonas más amplias, a las que por limitaciones de coste no se puede acceder.

Palabras Clave: Navegación, GPS, DGPS, Comunicaciones Radioelectrónicas, Inteligencia Artificial.

1 INTRODUCCIÓN

Durante el pasado siglo XX el hombre avanzó de manera notable en el eterno problema de la navegación que existía desde la antigüedad. Durante este periodo de tiempo hemos pasado de situarnos con un simple reloj y un sextante a los actuales y sofisticados sistemas de posicionamiento satelitarios GNSS (Global Navigation Satellite System). Entre ambos extremos, y a lo largo de estos últimos cien años el problema se ha resuelto de una manera más o menos satisfactoria mediante el empleo del goniómetro o los sistemas hiperbólicos (DECCA, LORAN, OMEGA, etc.), ya obsoletos y fuera de servicio en su mayor parte.

El relevo paulatino de aquellos por los modernos sistemas satelitarios más fiables, precisos y estables, especialmente el GPS, ha supuesto una auténtica revolución mundial en el arte de la navegación, pero también ha condicionado nuestras vidas y la economía mundial hasta el punto de que no sería desmedido predecir una auténtica catástrofe global en caso de supresión o interrupción de dicho sistema. Tal es la importancia y dependencia de este servicio que en la actualidad existen diversos métodos para mejorar su precisión, normalmente limitada, mediante la aplicación de correcciones diferenciales.

En el presente artículo se presenta una de las distintas técnicas existentes por las que se pueden canalizar las correcciones diferenciales que permiten mejorar la precisión del sistema GPS.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En navegación marítima la mejora de la precisión tiene interesantes aplicaciones como pueden ser la señalización de naufragios, bancos de peces, entrada de cuevas submarinas, etc., incluso la indicación de montículos o rocas submarinas que pueden resultar de vital importancia para la navegación costera, pues dependiendo del calado de la embarcación puede peligrar su integridad.

2 SISTEMA RASANT

Podemos mejorar la precisión de la posición indicada por nuestro receptor GPS mediante las técnicas conocidas como GPS Diferencial (DGPS), a través de las cuales eliminamos o mitigamos los errores introducidos por la Disponibilidad Selectiva (actualmente desactivada) y otras fuentes de errores inherentes al propio sistema GPS [2]. La idea fundamental para ello está basada en que la distancia que media entre los satélites del sistema GPS y la Tierra es tan grande que el desplazamiento en la superficie de ésta resulta insignificante. De esta manera, dos receptores que se encuentren separados una distancia de por ejemplo 200 kilómetros, utilizan prácticamente el mismo pasillo atmosférico para la recepción de las señales GPS, y por consiguiente ambos receptores sufren los mismos retrasos y tienen los mismos errores exceptuando el error de multisenda y el propio de cada receptor.

Aprovechando esta singularidad podemos dedicar uno de estos receptores a cuantificar estos errores, y posteriormente transmitir esta información al otro para que corrija su posición. Por consiguiente, el posicionamiento diferencial se basa en el uso de dos receptores, uno de los cuales actúa como estación de referencia y cuyas coordenadas de latitud, longitud y altura son conocidas con gran precisión, y otro receptor denominado rover o itinerante cuya posición queremos corregir mediante la información que se recibe de la estación de referencia, es decir, las correcciones diferenciales.

Independientemente del tipo de correcciones diferenciales obtenidas, ahora hemos de disponer de un medio para hacer llegar aquellas al usuario que desea corregir o mejorar su posición. A tales efectos, existen diversos sistemas tales como los radiofaros marinos, pseudolites, satélites geoestacionarios, sistemas celulares telefónicos como el GSM y subportadoras de emisiones de FM vía RDS [4].

Para este último caso, el envío de correcciones diferenciales a través de las subportadoras RDS de FM, existen compañías que ofrecen correcciones diferenciales emitidas a través de la banda lateral de las emisiones de FM. Este ha sido el caso de Radio Nacional de España y Radio Cataluña que han estado enviando correcciones diferenciales a todo el territorio nacional a través de sus emisoras de Radio Clásica y Cataluña Música, sin coste alguno para los usuarios. Para ello, y debido al estrecho segmento disponible, se han de comprimir primeramente las correcciones diferenciales que se generan en formato RTCM. Para realizar dicha compresión existen en Europa diferentes sistemas, uno de los cuales es el sistema alemán RASANT (Radio Aided Satellite Navigation Technique). Este software de compresión permite que a través de la subportadora de RDS (Radio Data System) de las emisiones de FM se pueda enviar toda la información correspondiente a las correcciones diferenciales de un solo satélite en un único grupo RDS, lo cual tiene lugar cada segundo, con lo cual si quisiéramos recibir las correcciones diferenciales de 6 satélites necesitamos 6 segundos. Por ello el sistema opera en tiempo cuasi real , porque para obtener una buena posición GPS [2] son necesarias las correcciones de 4 ó 6 satélites, es decir las correcciones sufren un retardo de 4 ó 6 segundos.

Además de ello, y para disponer de correcciones diferenciales con garantías, es necesario que la señal portadora de radiofrecuencia de FM llegue con un nivel mayor o igual a -68 dBm. O sea, aunque recibamos una señal de FM de buena calidad, pongamos por caso -75 dBm, las correcciones diferenciales no son válidas, y de hecho el receptor RASANT no es capaz de interpretarlas con un nivel de señal inferior a -68 dBm. En este sentido se hace necesario determinar las zonas de cobertura que nos permitiran obtener las correcciones diferenciales a través de la descompresión del sistema RASANT. En la sección 3, presentamos el proceso de captura de datos de cobertura. Por su parte en la sección 4, se presenta una estrategia de inteligencia artificial que será utilizada al objeto de generar un mapa de cobertura a partir de los datos adquiridos. Mientras en la sección 5 nos mostrará algunos resultados. Por último, en la sección 6 se mostrarán las conclusiones del trabajo.

3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Como hemos comentado anteriormente, el envío de correcciones diferenciales en Canarias ha ido de la mano de Radio Nacional de España (RNE), en sus emisiones de FM de Radio Clásica [10, 11]. Estas emisiones llegan desde el satélite Hispasat a todos los centros emisores de RNE distribuidos por el Archipiélago, y desde cada uno de ellos se transmiten en las diferentes frecuencias del programa de Radio Clásica.

Puesto que es imprescindible recibir un nivel de radiofrecuencia adecuado (mayor ó igual a -68 dBm) para garantizar la buena decodificación e interpretación de las correcciones en compresión RASANT [10, 11, 12], y a los efectos de tener una idea aproximada de los niveles de RF existentes en las aguas del Archipiélago, se han realizado diversos viajes a lo largo de diferentes rutas comerciales, para su adquisición. La figura 1 detalla la disposición del equipamiento empleado para la recolección de datos, y en la cual puede apreciarse que además de los niveles de RF también se iban adquiriendo, paralelamente, las coordenadas GPS y DGPS (cada 60 segundos) a lo largo de la ruta realizada.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

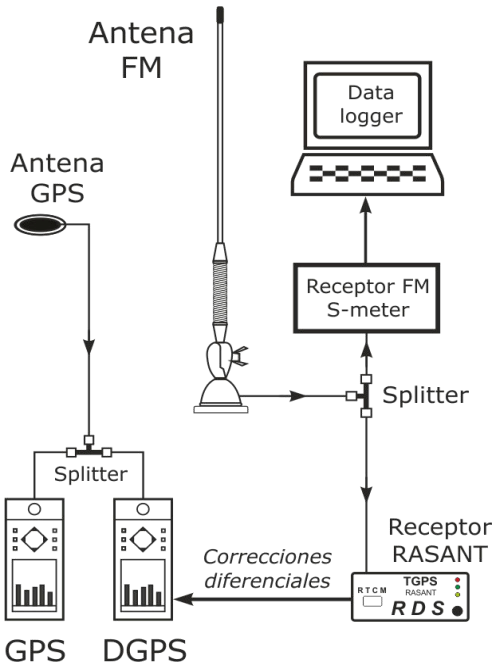


Figura 1. Disposición del equipamiento utilizado durante la adquisición de datos.

Además de ello, y para disponer de correcciones los niveles de RF fueron captados por una antena de FM capaz de cubrir todo el espectro de Frecuencia Modulada, es decir, de los 87,5 a los 108 MHz, y aunque es verdad que hay una diferencia de 1,3 dBm entre los extremos de todo este ancho de banda, podemos considerar la respuesta de la antena bastante lineal. Las señales de FM se inyectan en un splitter, que manteniendo su impedancia característica en ambas salidas aplica el mismo nivel de RF tanto al receptor RASANT como al receptor – data logger de FM que graba los niveles de RF recibidos en cada punto.

Cabe destacar que una misma ruta marítima puede recibir el mismo programa de Radio Clásica por diferentes frecuencias, con lo cual el nivel de RF en algunos tramos del recorrido puede estar garantizado, si bien es verdad que siempre hay zonas oscuras a las que no llega nivel suficiente para interpretar las correcciones diferenciales.

En el caso que nos ocupa en este artículo presentamos la singladura realizada entre Santa cruz de La Palma y Santa Cruz de Tenerife. Según puede apreciarse en la figura 2, a lo largo de la misma pueden recibirse señales desde las emisoras de radiodifusión indicadas como Cumbre Nueva (La Palma), Izaña y La Montañeta (Tenerife). Todas ellas actúan a modo complementario, en cuanto a cobertura de RF se refiere, puesto que ninguna de las tres se recibe con la intensidad de campo suficiente a lo largo de todo el trayecto. A pesar de esta complementariedad, siempre habrá zonas en las que no se reciba un nivel de señal adecuado, y dado el elevado coste que supone medir los niveles de señal de manera exhaustiva, puede recurrirse a algún mecanismo que pueda predecir donde puede haber nivel de RF suficiente. En este sentido, las técnicas de inteligencia artificial resultan un recurso muy útil de cara a la consecución de este objetivo.

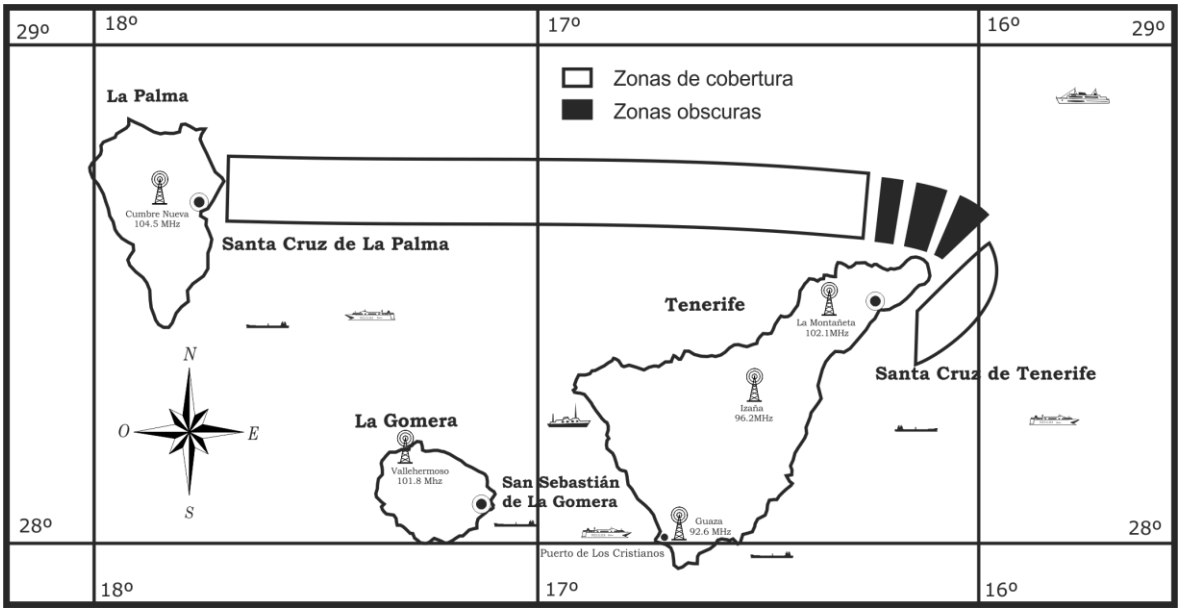


Figura 2. Mapa de la zona marítima canaria estudiada y estaciones emisoras implicadas en la transmisión RASANT.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4 SISTEMA NEURO-FUZZY GENÉTICO.

Como es bien sabido existen diferentes paradigmas en el campo de la Inteligencia Artificial [1, 3, 7, 8, 9]. En este trabajo se ha optado por utilizar un sistema neuro-fuzzy genético. Dicho sistema tiene la particularidad de combinar diferentes paradigmas con una amplia aplicación en el campo de los algoritmos de Inteligencia Artificial. Mientras que el paradigma de las redes neuronales, viene caracterizado por su capacidad de aprendizaje a partir de un cierto conjunto de datos de referencia, los sistemas fuzzy tienen la particularidad de reflejar el conocimiento a través de reglas. Por su parte, los algoritmos genéticos inspirados en el proceso biológico de la evolución genética nos permiten a través este proceso evolucionar hacia mejores soluciones. En el caso de este trabajo se ha utilizado un sistema neuro-fuzzy genético con una estructura tipo ANFIS [1] [5, 6]. En la figura 3, se presenta un esquema simplificado de la red de tres capas utilizada en este caso.

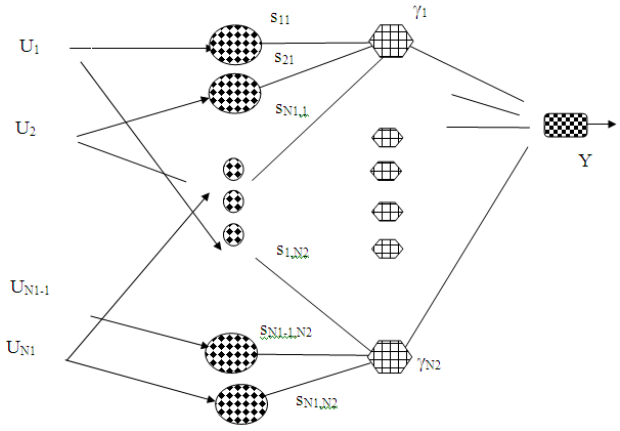


Figura 3. Esquema del sistema neuro-fuzzy genético.

Seguidamente, mostramos las operaciones realizadas por cada uno de los nodos. En (1) mostramos la ecuaciones para los nodos de la primera capa, mientras que en (2) y (3) presentamos las respectivas ecuaciones para la capa intermedia y capa de salida.

$$s_{ij} = \exp\left(-\frac{\left(U_i - m_{ij}\right)^2}{\sigma_{ij}^2}\right) \qquad \begin{matrix} j=1,2,\ldots,N_2 \\ i=1,2,\ldots,N_1 \end{matrix} \qquad (1)$$

$$\gamma_i = \min\left|p_{1j}, p_{2j}, \ldots, p_{N_1 j}\right| \quad j = 1,\ldots,N_2 \qquad (2)$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} sv_{j1}\gamma_j}{\sum_{j=1}^{N_2} \gamma_j} \qquad (3)$$

Obsérvese que N_1 es el número de entradas, mientras que N_2 corresponde al número de nodos en la capa intermedia, y U_i corresponde a la entrada i-ésima. Por su parte, m_{ij}, σ_{ij} y s_{ij} son el centro, el ancho de la función de pertenencia y la salida de la entrada i-ésima y el nodo j-ésimo. Asimismo, se puede observar que la ecuación (2) calcula el mínimo del conjunto de salidas a que hace referencia de los nodos de la primera capa. Por último, a través de la ecuación (3) se calcula la salida Y que depende de los valores sv_{jk}, denominados valores estimados de la salida.

En el caso particular de este trabajo, se elegirán como entradas los valores de latitud y longitud proporcionados por el receptor GPS, de tal forma que con esta información indicamos la localización del barco. Mientras que la salida nos indicaría si existe o no cobertura RASANT. Por tanto, la salida ha sido escogida para tomar valores de uno cuando existe cobertura y de cero en caso contrario. Como se indicó en secciones anteriores de cara a este trabajo se entiende que no hay cobertura cuando el nivel de señal está por debajo de -68 dBm puesto que en tal caso aunque se reciba la señal no es posible extraer datos fiables.

4.1 ALGORITMO DE APRENDIZAJE.

Teniendo en cuenta la figura 3, se puede observar que para definir un sistema neuro-fuzzy genético concreto se han de determinar los siguientes parámetros m_{ij}, σ_{ij} y sv_{jk} , si bien también es necesario determinar un número concreto de nodos N_2 en la capa intermedia. En el caso presentado en este trabajo, desearíamos obtener un sistema que a partir de valores de latitud y longitud nos proporcionará valores indicativos de la existencia o no existencia de cobertura RASANT.

Al objeto de determinar los parámetros señalados previamente, hemos de elaborar y aplicar un algoritmo de ajuste. En particular, se han utilizado tres paradigmas diferentes de la inteligencia artificial. Inicialmente se ha aplicado un algoritmo no supervisado basado en la red neuronal de Kohonen para determinar los parámetros m_{ij} y sv_{jk}. Por su parte los parámetros σ_{ij} y el número de reglas final N_2 se determinan en una segunda fase mediante la aplicación de un algoritmo genético. Es decir, se consideran diferentes configuraciones de la estructura presentada en la figura 3, donde se varía el número de nodos N_2 y mediante una función de costo sobre los valores de entrenamiento se evoluciona a la estructura con un valor de función de costo menor. Simultáneamente, se varían los valores σ_{ij} de tal forma que la función de costo también depende de la elección de estos parámetros. Concretamente, cada individuo está constituido por la elección del conjunto de reglas y la elección de los parámetros σ_{ij}. Debido a que está fase de entrenamiento modifica la estructura del sistema, en tanto en cuanto permite una elección dinámica del número de reglas, se ha considerado en este trabajo asignar la denominación de sistema neuro-fuzzy genético al sistema utilizado.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En la siguiente sección se indican los resultados obtenidos en la aplicación de estos algoritmos al caso de la determinación del mapa de cobertura.

5 APLICACIÓN DE LA APROXIMACIÓN NEURO-FUZZY GENÉTICA.

Tal como se indicó en los apartados previos se realizaron medidas de cobertura a lo largo de una travesía entre la isla de La Palma y Santa Cruz de Tenerife. De estas muestras se tomó un 75% para realizar el entrenamiento, mientras que el resto de patrones (25%) se reservaron para determinar las propiedades de generalización del sistema neuro-fuzzy genético resultante.

Se realizaron varios ensayos con estas muestras. Seguidamente, se muestran los resultados para la primera fase de aprendizaje no supervisada para el caso de elegir 300 nodos en la capa intermedia (N_2=300) y un número de iteraciones de 5000 épocas. En este caso, se obtuvo un error cuadrático medio de 0.1634, para los patrones utilizados en entrenamiento, mientras que para los patrones reservados para determinar las propiedades de generalización se obtuvo un valor de 0.1624. Estos errores indican que es necesario aplicar nuevos procesos de entrenamiento. En este sentido, se pasó a la segunda fase de entrenamiento, focalizada en la aplicación de un algoritmo genético. En este caso, se utilizó una población de 50 individuos, aplicando el operador de cruce en un 20% respecto al operador de mutación de un 80%. El resultado de la aplicación del algoritmo genético nos llevó desde las 300 reglas de partida a la elección de 168 reglas para la estructura final del sistema neuro-fuzzy genético. En la figura 4 se observa una gráfica de la evolución del entrenamiento genético.

En dicha figura se observa como el valor de la función de costo disminuye a partir de las primeras generaciones, llegando a alcanzar un valor para el mejor individuo de 0.0091852, de igual forma se puede observar como a medida que el número de generaciones evoluciona la distancia entre los individuos disminuye haciendo que la media sobre la población de individuos se asemeje más al valor del mejor individuo. En este caso al alcanzar la generación 50 se obtuvo un valor medio de la función de costo para todos los individuos de la población de 0.0092279.

Con este valor de función de coste en este caso se obtiene un error cuadrático medio sobre el conjunto de entrenamiento de 0.036094, mientras que el error cuadrático medio de generalización se situó en 0.038673. Estos valores de error llevaron a obtener un nivel de acierto en los patrones de generalización del 88%. Seguidamente, se realizaron varios ensayos a partir de los datos obtenidos en la segunda fase de entrenamiento, utilizando un algoritmo de entrenamiento supervisado, tal como se indicó en la sección anterior. Si bien en este caso para un ensayo realizado con 5000 iteraciones el error cuadrático medio del conjunto de entrenamiento se situó en 0.0198 frente a un error cuadrático medio del conjunto de generalización de 0.0832, no modificando el 88 % de acierto obtenido en la etapa anterior.

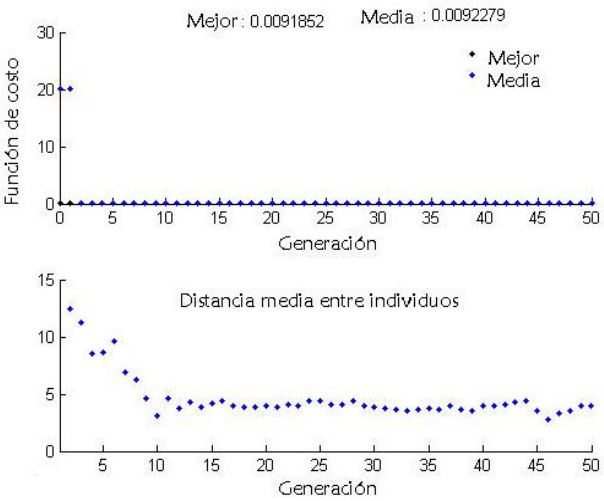


Figura 4. Evolución de la función de costo en la aplicación del algoritmo genético.

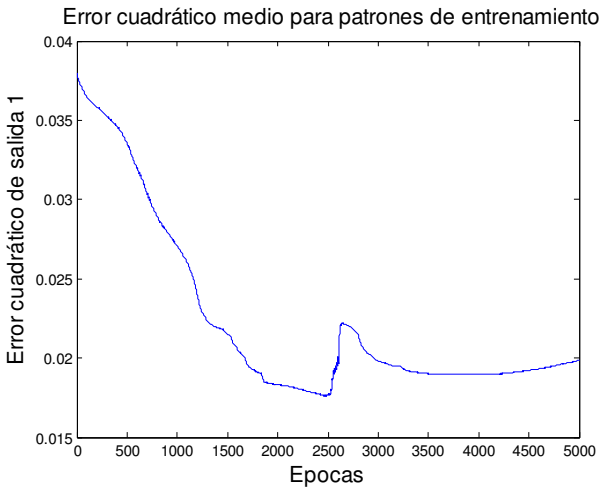


Figura 5. Evolución del error cuadrático medio en la fase de entrenamiento supervisado.

En la figura 5 se muestra la evolución del error cuadrático medio. Si bien en este ensayo se continuó el entrenamiento hasta 25000 épocas, no se observaron mejoras significativas en los valores de error cuadrático medio.

6 CONCLUSIONES.

En este trabajo se han realizado diferentes ensayos utilizando un esquema neuro-fuzzy genético que han mostrado resultados satisfactorios. Concretamente, la aportación se ha centrado en partiendo de un conjunto de datos de campo obtenidos en diferentes travesías realizadas a través de la Zona Marítima de Canarias, determinar las posibilidades de aplicación de este esquema inteligente para predecir posibles zonas de cobertura a partir de datos obtenidos experimentalmente. Los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

resultados muestran un nivel de acierto en las predicciones satisfactorio, permitiendo la elaboración de mapas de cobertura a lo largo de zonas más amplias que las estudiadas experimentalmente. Esta aproximación nos permite determinar en áreas más extensas la posible cobertura de señal sin realizar un proceso de medida exhaustivo sobre dichas áreas, dado que resultaría costoso en términos económicos y de tiempo. Es de interés indicar que la determinación de la posición exacta de un buque es de importancia vital sobre todo cuando se realiza navegación costera, dado que simplemente un montículo submarino podría causar una vía en el casco, con las consecuencias fatales que puede causar tal hecho, como se ha demostrado en algunos accidentes de buques recientes. Por tanto, este trabajo intenta poner de manifiesto la importancia de sistemas alternativos a los estándares, aportando nuevas herramientas que ayuden a la planificación de rutas por parte de los navegantes.

Referencias

[1] Jang J. R. (1993).ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybenetics,* Vol. 23, No. 3. 665-685.

[2] Kaplan, Elliott D.: "Understanding GPS: Principles and Aplicatioins". Artech House Publishers. 2005.

[3] Kohonen T., Self-Organizing Maps. Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.

[4] Kopitz, Dietamar & Marks, Bev. "RDS: The Radio Data system". Artech House Publishers. Londres, 1999.

[5] Marichal, G.; Acosta, L.; Moreno, L.; Méndez, J.; Rodrigo, J., Sigut, M., (2001), "Obstacle avoidance for a mobile robot: A neuro-fuzzy approach" *Fuzzy Sets and Systems*, 124, 171-179

[6] Marichal, G.N, Hernández, A., Acosta, L. and González, E.J., (2009), "A neuro-fuzzy system for extracting environment features based on ultrasonic sensors" *Sensors*, no. 9(12), 10023–10043; doi: 10.3390/s91210023, 9AD.

[7] Mitra S., Hayashi Y., 2000, Neuro-fuzzy rule generation: Survey in soft computing framework, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11 (3) pp. 748-768.

[8] Pedrycz, W., (1993) Fuzzy sets and fuzzy systems, Research Studies Press, England.

[9] Zadeh, L., (1965) "Fuzzy logic", *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 100-106.

[10] http://www.icc.cat/cat/Home-ICC/Informacio-corporativa [Acceso: Abril 2014]

[11] http://www.oocities.org/espanol/nivelredes/eps/3dgps.htm [Acceso: Mayo 2014]

[12] https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_267-raven.pdf [Acceso: Mayo 2014]

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España DPI 2010-20751-C02-02.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL FUZZY DE LA VELOCIDAD DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

Jose A. Cortajarena[a] *, Oscar Barambones[b], Patxi Alkorta[a], Julián De Marcos[a]

[a] EUITI Eibar, Universidad del País Vasco. Otaola, 29. 20600 Eibar. España.
[b] EUITI Vitoria, Universidad del País Vasco. Nieves Cano 12. 01006 Vitoria. España

Resumen

En este artículo se presenta un control del motor de inducción basado en lógica borrosa. El lazo de velocidad del motor es regulado con un controlador fuzzy. Este controlador reemplaza al PI convencional empleado en el control vectorial de los motores de inducción. Las prestaciones que se consiguen del controlador son buenas como queda demostrado en las simulaciones realizadas así como en las pruebas realizadas en un motor de 7.5kW. Los resultados demuestran unas mejores prestaciones y robustez con respecto a los controladores convencionales cuando hay un desconocimiento de los parámetros del sistema.

Palabras Clave: Control fuzzy, motor inducción, Lyapunov, regulación velocidad.

1. INTRODUCCIÓN

Un motor de inducción se controla empleando normalmente controladores convencionales PI o PID. En la práctica estos controladores se desarrollan empleando modelos matemáticos más o menos aproximados del sistema. En estos modelos matemáticos entre otras suposiciones se asume que los parámetros son constantes. Sin embargo en un motor real las no linealidades y la variación de parámetros degradan las prestaciones del sistema controlado hasta el punto de hacer inestable el sistema (Vas, 1999). Para solucionar o disminuir estos problemas los parámetros del motor que los controladores emplean deben ser adaptados de forma continua. Esta adaptación se puede realizar empleando diferentes técnicas como son el MRAC o control adaptativo basado en un modelo de referencia (Zhen y Xu, 2007), con controladores en modo deslizante (Won y Bose, 1992) o con PIDs autoajustables (Astrom y Hagglung, 1996). Para algunas de estas técnicas los parámetros del motor y la inercia de la carga tienen que calcularse en tiempo real, lo que supone un elevado procesado por parte del DSP empleado en el control.

Además, en los controladores convencionales durante el proceso de ajuste final el conocimiento del diseñador resulta imprescindible. Consecuentemente, un diseño o ajuste final del controlador se atribuye a un conocimiento heurístico del ingeniero sobre el sistema.

Una ventaja de los controladores fuzzy es que permiten incorporar el conocimiento de ajuste de los mismos en el propio controlador basándose en reglas (Zadeh, 1965). Ya que las reglas son las que definen el comportamiento del controlador no se precisa para su implementación ningún parámetro del motor, dando al controlador diseñado un grado de robustez que no poseen los controladores basados en los modelos matemáticos (Li, 1998).

2. ESTRUCTURA DE CONTROL Y ECUACIONES DEL MOTOR

En la figura 1 se puede observar el diagrama esquemático del control indirecto del motor de inducción con el controlador fuzzy.

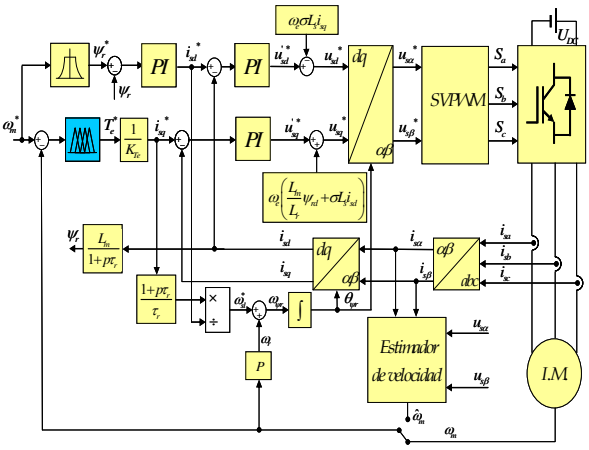


Figura 1: *FOC indirecto con controlador fuzzy.*

El sistema está compuesto de cuatro controladores. El controlador fuzzy de velocidad, el controlador de corriente responsable del par de la máquina, el controlador de flujo y el controlador de corriente responsable del flujo de la máquina.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El elemento de desacoplo se emplea en un inversor de tensión controlado por corriente para producir las tensiones adecuadas del estator (Vas, 1999), y el bloque de debilitamiento de flujo se incluye para poder incrementar la velocidad del motor por encima de su velocidad nominal.

Las ecuaciones del modelo del motor en el sistema de referencia general son,

$$\bar{v}_{s,dq} = R_s \bar{i}_{s,dq} + \frac{d\bar{\psi}_{s,dq}}{dt} + j\omega_g \bar{\psi}_{s,dq} \quad (1)$$

$$0 = R_r \bar{i}_{r,dq} + \frac{d\bar{\psi}_{r,dq}}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\bar{\psi}_{r,dq} \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_{s,dq} = L_s \bar{i}_{s,dq} + L_m \bar{i}_{r,dq} \quad (3)$$

$$\bar{\psi}_{r,dq} = L_r \bar{i}_{r,dq} + L_m \bar{i}_{s,dq} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} \left(\psi_{rd} I_{sq} - \psi_{rq} I_{sd} \right) \quad (5)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (6)$$

Donde,

dq y $\alpha\beta$ son los ejes del sistema de referencia genérico, y del sistema de referencia estático o fijado al estator.

$\bar{v}_{s,dq}$, $\bar{i}_{s,dq}$ y $\bar{\psi}_{s,dq}$ son los vectores de la tensión, corriente y flujo del estator respectivamente.

$\bar{i}_{r,dq}$ y $\bar{\psi}_{r,dq}$ son los vectores de la corriente y flujo del rotor.

$\omega_r, \omega_g, \omega_s$ y ω_m son la velocidad del rotor, del sistema de referencia general, deslizamiento y velocidad mecánica del rotor.

L_m, L_s y L_r son las inductancias mutua, del estator y del rotor.

R_s y R_r son las resistencias del estator y del rotor.

T_e y T_L son el par electromagnético del motor y de carga.

J y B son la inercia del sistema y coeficiente de rozamiento.

La velocidad medida del rotor se compara con la referencia para generar un error de velocidad y un gradiente de error de velocidad. Estas dos variables son las entradas del controlador fuzzy de velocidad que se encarga de generar la consigna de corriente del estator iq* que produce el par del motor. El controlador de flujo genera la consigna de corriente del estator id* de acuerdo con el perfil de flujo de la máquina. Las dos corrientes son las entradas de dos controladores que producen las tensiones del estator en el sistema de referencia ligado al flujo del rotor y luego transformado al sistema estacionario. Con el inversor se genera el vector de tensión que se aplica al motor.

3. CONTROLADOR FUZZY

El objetivo del controlador es conseguir que el error de seguimiento de velocidad del sistema $e = \omega_m - \omega_m^*$ sea cero. Por tanto, se diseñará un controlador cuya salida z(t) lleve al sistema hacia el estado e = 0.

En este trabajo se propone un control fuzzy basado en el diseño heurístico. La heurística es la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, mediante reglas empíricas, etc. Por ejemplo, el control manual que realiza un operario experimentado sobre un sistema es un tipo de control heurístico, donde el operario decide las acciones de control en función del estado del sistema y de su experiencia y conocimientos sobre el mismo.

La lógica borrosa permite inferir conclusiones a partir de una serie de condiciones expresadas de forma lingüística mediante reglas ***Si–Entonces***. Esta capacidad de la lógica borrosa puede ser empleada para incorporar el conocimiento de un experto a un sistema de control automático, obteniéndose un controlador borroso basado en heurística cuyo comportamiento, una vez realizados los ajustes pertinentes, puede ser bastante similar al del operario real. Además, no es necesario disponer de un modelo de la planta a controlar, ya que en muchos casos basta con el conocimiento del operario y el modelo mental que este posee sobre la planta para desarrollar un controlador. Precisamente estos aspectos de la lógica borrosa fueron los que resultaron más atrayentes en sus inicios, y los que provocaron el gran auge que tuvo esta tecnología durante los años 70. El no disponer de modelo de la planta y, por tanto, de modelo del sistema en lazo cerrado, ciertamente puede traer problemas asociados, como por ejemplo la imposibilidad de poder realizar un análisis formal de propiedades del sistema tales como estabilidad y robustez. Sin embargo, las múltiples herramientas existentes hoy en día para simular sistemas complejos, permiten que vía simulaciones, y de una forma un tanto empírica si se quiere, puedan ser analizadas las propiedades anteriores en las regiones de operación de interés.

Para obtener la base de reglas mostrada en la tabla 1 se observa el valor de consigna y el valor de realimentación y se determina el valor que ha de aportar la salida del controlador para corregir la desviación entre la consigna y el valor real. Si se analiza esto en el lazo de velocidad se intuye que un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

incremento positivo del error (debido a que la velocidad real de la maquina disminuye) exige al controlador incrementar su valor de control o consigna de par para acelerar la maquina. Sucede lo mismo con la derivada del error; si la derivada del error es positiva grande (PG) significa que la maquina esta decelerando, por tanto resulta evidente que habrá que aportar más par a la máquina para que esto no suceda y así la salida del controlador debe ser positiva grande (PG).

La figura 2 muestra el diagrama en bloques de dicha estructura de control, donde la salida del controlador fuzzy (z) es el incremento del par que se debe aplicar al sistema para corregir el error de velocidad.

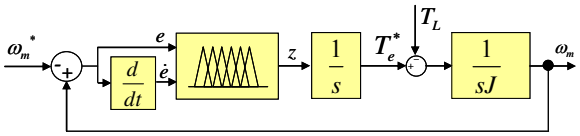


Figura 2: Lazo de control de velocidad.

Considerando que se debe cumplir (12) se puede obtener la tabla 1 para el controlador fuzzy.

Tabla 1: Reglas del controlador fuzzy.

$\dot{e}/e$	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	PG	PG	PG	PG	PM	PP	ZE
NM	PG	PG	PG	PM	PP	ZE	NP
NP	PG	PG	PM	PP	ZE	NP	NM
ZE	PG	PM	PP	ZE	NP	NM	NG
PP	PM	PP	ZE	NP	NM	NG	NG
PM	PP	ZE	NP	NM	NG	NG	NG
PG	ZE	NP	NM	NG	NG	NG	NG

Para una implementación práctica del controlador borroso en un DSP (procesador digital de señal) se emplean funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal como antecedentes y consecuentes, ya que facilitan el procesado de cálculo en comparación con funciones del tipo gausiano y campana. La variable lingüística error y derivada del error y la posición de sus términos lingüísticos se muestran en la figura 3 y 4, los valores del error y derivada del error están normalizados, así un error de 1 equivale a un error de 1000 rpm.

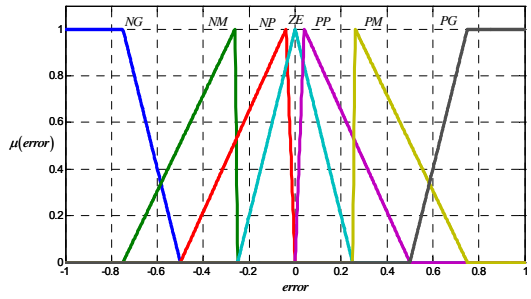


Figura 3: Variable lingüística error y sus términos lingüísticos.

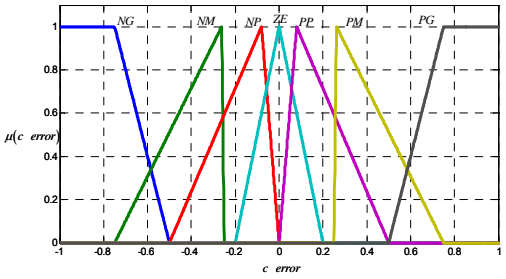


Figura 4: Variable lingüística derivada del error y sus términos lingüísticos.

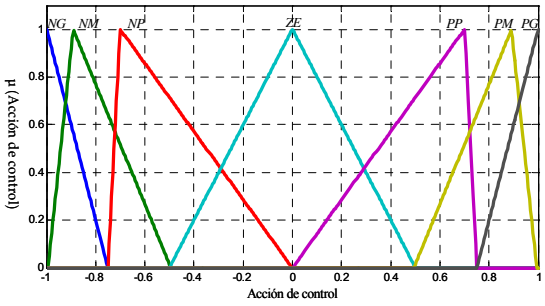


Figura 5: Funciones de pertenencia para la acción de control.

La variable lingüística de la acción de control o del consecuente, y la posición de sus términos lingüísticos se observa en la figura 5. Obsérvese que los términos están más desplazados hacia los extremos en comparación con los términos lingüísticos de la variable error y derivada del error para así garantizar el cumplimiento de (12).

Como se observa la tabla está compuesta de 49 reglas y la inferencia empleada es Mamdani con la composición max-min (Mandani y Assilian, 1975). Los resultados de la inferencia fuzzy son desborrosificados empleando el centro de gravedad o la ecuación del centro de área (Patel, 2005), (Nguyen *et al.*, 1995), ecuación (14).

$$z^{*COG} = \frac{\sum_{k=1}^{n} z_k \mu(z_k)}{\sum_{k=1}^{n} \mu(z_k)} \qquad (14)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

La plataforma donde se ha testado el controlador fuzzy propuesto (figura 6) está compuesta por un PC con MatLab7/Simulink R2007a, dsControl 3.2.1 y la tarjeta de control DS1103 en tiempo real de dSpace con un procesador PowerPC de coma flotante de 1GHz (dSPACE, 2005). La máquina eléctrica empleada es una máquina comercial de ABB de 7.5 kW, 1447 rpm, (Tabla 2) controlada por un inversor de potencia. La carga mecánica es generada por un motor síncrono de 10.6 kW, el 190U2 Unimotor. La velocidad mecánica se mide con un encoder de 4096 impulsos por revolución empleando la técnica del periodo múltiple (Cortajarena, *et al.*, 2006).

La corriente de la máquina se limita al valor nominal para protegerla de sobrecorrientes. Todos los sensores para medir las corrientes, tensión de BUS y velocidad son adaptados para poder conectarse a la tarjeta de control DS1103.

Tabla 2: Parámetros de la máquina de inducción de ABB.

Tensión del estator	380 V
Corriente nominal del estator	14 A
Velocidad nominal	1447 r.p.m.@ 50 H
Par nominal	50 Nm
Resistencia del estator	0.72 Ω
Resistencia del rotor	0.4 Ω
Inductancia magnetizante	0.11 H
Inductancia de dispersión del estator	0.0025 H
Inductancia de dispersión del rotor	0.0025 H

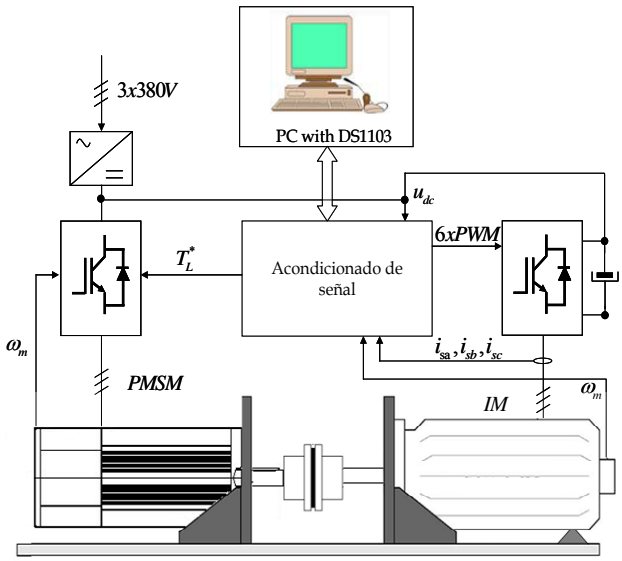


Figura 6: Estructura de la plataforma experimental para el control de la máquina de inducción (IM).

Se realizaron simulaciones del sistema en diferentes condiciones de trabajo así como con variación de parámetros del motor.

Para garantizar que el sistema simulado se asemeja al real se realizan diferentes ensayos. Los resultados seleccionados se muestran en las figuras 7 y 8. La parte superior de cada figura corresponde a las formas de onda obtenidas en el sistema real mientras que las de la parte inferior pertenecen al sistema simulado.

En la figura 7 se impone al motor una referencia cuadrada de velocidad. En la aceleración de -200 a 200 r.p.m. el controlador se satura al límite establecido de 20 amperios. Se observa también que la regulación en el régimen estacionario es correcta y que tanto la simulación como la situación real se asemejan considerablemente. Lo mismo sucede en el resto de las gráficas de la figura 7, esto es, en las componentes alfa y beta de la corriente del estator.

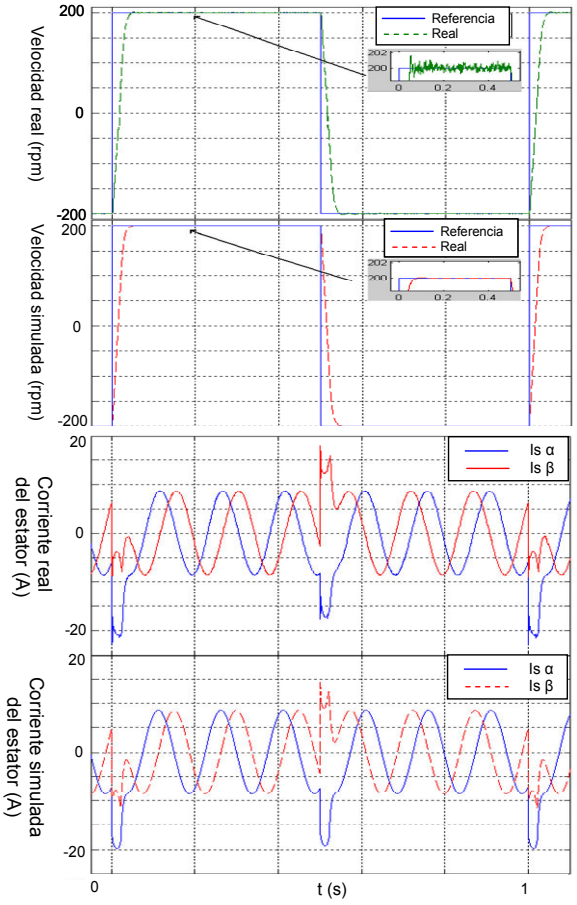
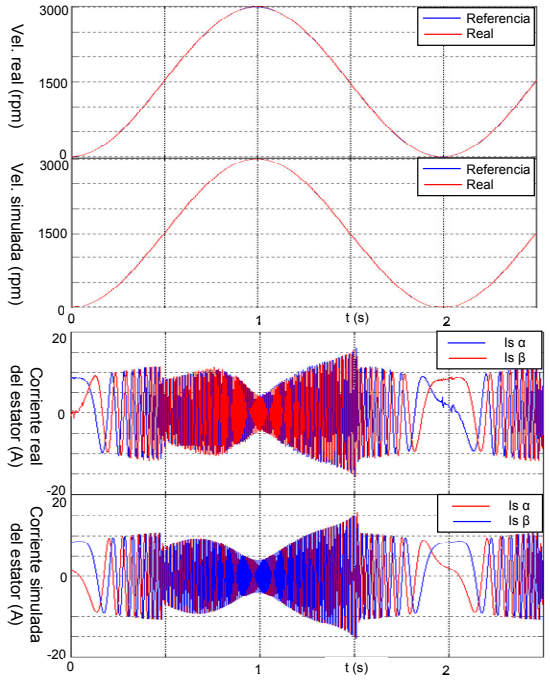


Figura 7: Señales obtenidas en la plataforma experimental y simuladas para una referencia de velocidad cuadrada .

La figura 8 muestra las señales de simulación y sistema real cuando la referencia de velocidad es sinusoidal. La velocidad mínima es cero, motor parado, y la máxima es 3000 rpm o doble de la velocidad nominal. Esta prueba permite comprobar el comportamiento trabajando en la zona de debilitamiento de flujo En dicho ensayo el flujo pasa

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de su valor nominal 1 Wb a un valor inferior en función de la velocidad del motor, llegando a valer 0.45 Wb cuando la velocidad alcanza los 3000 rpm.



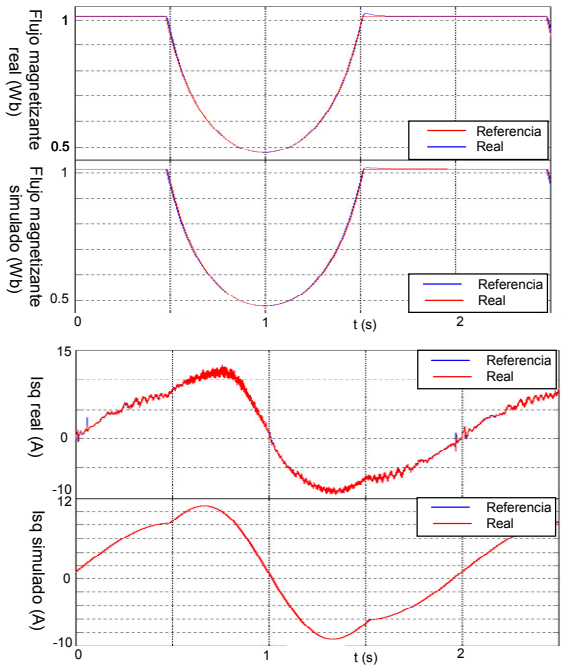


Figura 8: Señales en la región de debilitamiento de flujo obtenidas en la plataforma experimental y simuladas para una referencia de velocidad sinusoidal.

Las señales de flujo muestran un buen comportamiento del controlador de flujo y del regulador fuzzy en la regulación de velocidad cuando esta supera la velocidad nominal. En la misma figura, se observan la componente alfa y beta de la corriente del estator en el sistema real y simulado y la componente q de la corriente del estator encargada de la generación de par electromagnético.

Estas pruebas y más no presentadas en la publicación validan el sistema simulado permitiendo continuar con simulaciones para analizar la robustez cuando se producen variaciones de parámetros en el motor.

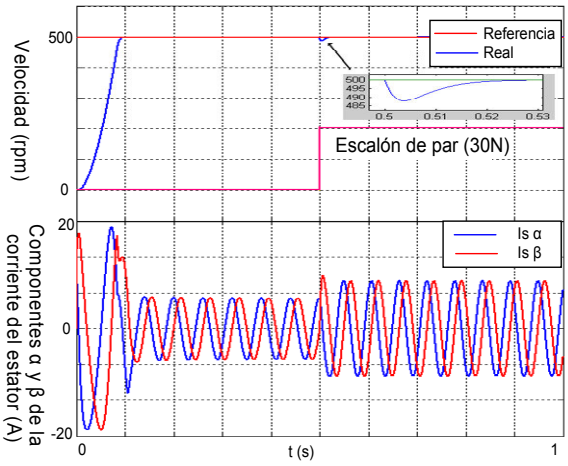


Figura 9: Regulación de velocidad con escalón de par en la carga.

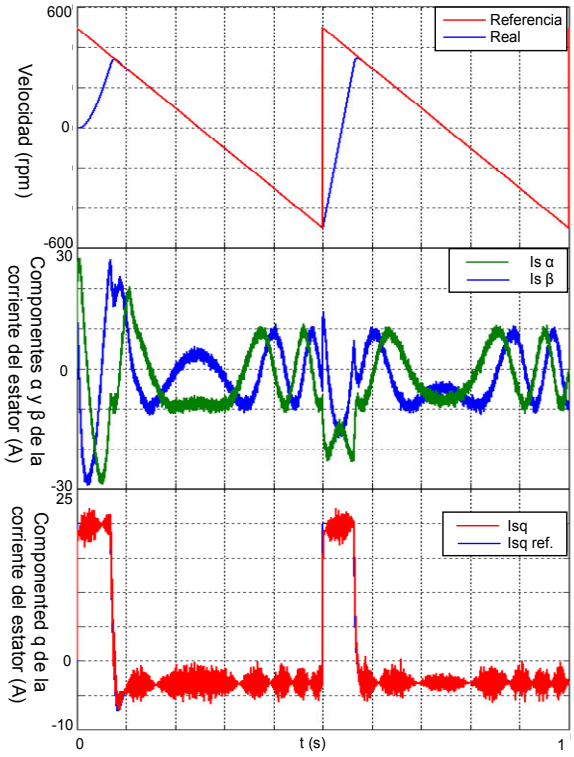


Figura 10: Regulación de velocidad con ruido introducido en la medida de corriente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La figura 9 muestra un comportamiento correcto del controlador fuzzy en la regulación de velocidad cuando se aplica una perturbación de par en modo escalón a la máquina. Se observa una rápida corrección de la velocidad al valor prefijado de consigna.

En la figura 10 se observa la regulación de velocidad cuando a la corriente se le inyecta un ruido blanco de alta frecuencia. La regulación de velocidad es correcta aun cuando exista un ligero nivel de ruido en la medida de velocidad.

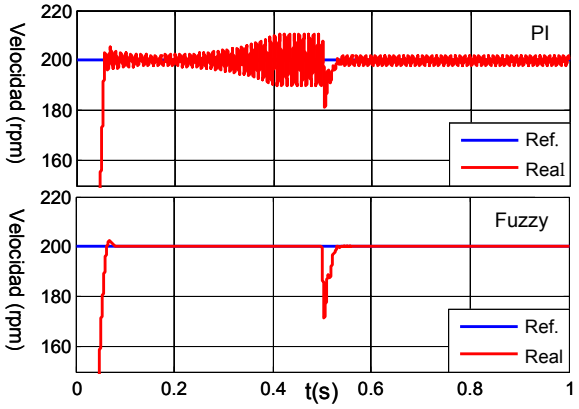


Figura 11: Regulación de velocidad con el controlador fuzzy y con controlador convencional PI ante variación de parámetros de la máquina.

El hecho de que el regulador borroso se fundamente en reglas lingüísticas aporta cierto grado de robustez al sistema (Li, 1998). Para verificar esta afirmación se reemplaza la máquina empleada por una nueva, en la que los parámetros resultan ser diferentes. Los parámetros de la nueva máquina son: Rr=1.2 Ω, Rs=1.5 Ω, Lm=0.108 H, Lr=0.13 H, Ls=0.13 H y J=0.04 Kg*m^2. Con estos valores y sin realizar ningún ajuste en el regulador PI convencional y en el regulador borroso se comprueba el comportamiento del motor. Empleando para determinar el deslizamiento la constante de tiempo del rotor correcta, con ambos controladores el comportamiento del sistema sigue siendo estable como se observa en la figura 11. Las dos gráficas muestran el comportamiento cuando se introduce un escalón de par de 40 Nm a los 0.5 s. Aunque en ambos casos el sistema permanece estable, el rizado de velocidad es considerablemente inferior en el sistema regulado por el controlador borroso.

5. CONCLUSIÓN

En este artículo se muestra un control indirecto del motor de inducción reemplazando el controlador PI de velocidad por un controlador fuzzy. Tras definir el controlador fuzzy se realizan simulaciones que son comparadas con los resultados obtenidos en la plataforma experimental. La similitud entre las simulaciones y el sistema real permiten analizar el comportamiento del controlador ante variaciones de parámetros y ruido como se ha presentado. Se muestra que no se requieren los parámetros del motor para realizar el diseño del sistema y además se observa una robustez inherente al control fuzzy.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Universidad del País Vasco (GIU13/41 y UFI11/07)

Referencias

Astrom K.J., Hagglung T. 1996. Automatic tuning of PID controllers. The Control Handbook. A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press CRC Press, Inc. pp 817-846.

Cortajarena, J.A.,.De Marcos J, Alkorta P., Vicandi F.J., Alvarez P. September 2006. System to study induction motor speed estimators. SAAEI06,Gijón.

dSPACE, 2005. Real Time Interface. Implementattion Guide.Experiment Guide. For Realese 5.0. GmbH Paderborn. Germany.

Jantzen, J., 1998. Tuning of Fuzzy PID Controllers. Tech. report no 98-H-871 (fpid), technical University of Denmark, Lyngby.

Li, W., 1998. Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller. IEEE. Trans. Fuzzy Syst., Vol. 6, no. 4, pp 449-463.

Mandani E.H Assilian, S. 1975. Application of fuzzy algorithms for simple dinamyc plant". Proc. IEE, 121, 1585-8.

Nguyen, H.T., Sugeno, M., Tong, R., Yager, R.R., 1995. Jhon Wiley &Sons Inc., Theoretical aspects of fuzzy control.

Patel A. V., 2005. Simplest Fuzzy PI Controllers under Various Defuzzification Methods. International Journal Of Computational Cognition, Vol. 3, no. 1, pp 21-34.

Slotine, J.J.E., Li, W. 1991. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. .Applied Nonlinear Control.

The Math Works Inc. Fuzzy Logic Toolbox User Guide.

Vas, P., 1999. Oxford University Press, Inc. Artificial-Intelligent-Based Elecrical Machines and Drives. Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-Neural, and Genetic-Algorithm-Based Techniques. New York..

Won, C.Y., Bose, B.K. 1992. An Induction Motor Servo System with Improved Sliding Mode Control. IEEE Conf. Proceedings of IECON'92, pp. 60-66.

Zadeh, L.A, 1965. Fuzzy sets. Information and Control, Vol. 8 pp 338-353.

Zhen, L. Xu, L. 2007. Sensorless Field Oriented Control of Induction Machines Based on a Mutual MRAS Scheme. IEEE Trans. on Indust. Electonics. Vol 45. no.5. pp 824-830.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DECODIFICACIÓN DE LA MARCHA HUMANA MEDIANTE SEÑALES EEG

Joaquín Alcázar, Andrés Úbeda, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez y José M. Azorín
Brain-Machine Interface Systems Lab, Universidad Miguel Hernández
Ed. Innova, Avda. de la Universidad S/N, 03202 Elche (Alicante)
Email de contacto: aubeda@umh.es

José L. Pons
Grupo de Bioingeniería, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Ctra. Campo Real km 0.200, 28500 La Poveda, Arganda del Rey (Madrid)

Resumen

En este estudio se ha analizado una metodología para decodificar y clasificar la fase de la marcha humana a partir de componentes EEG de baja frecuencia. Se han distinguido dos fases: apoyo y balanceo. Para obtener la fase de marcha, se ha decodificado el ángulo de rodilla y posteriormente se ha analizado la tendencia del ángulo para obtener cada uno de los estados de la marcha. Los resultados obtenidos muestran una gran correlación entre los ángulos decodificados y los ángulos reales de rodilla. La tasa de acierto en la clasificación de los estados de la marcha es aproximadamente del 70%, lo que sugiere que esta metodología podría aplicarse en tiempo real durante procesos de rehabilitación con exoesqueletos.

Palabras Clave: decodificación, señales EEG, marcha humana, regresión lineal.

1 INTRODUCCIÓN

En la última década, las interfaces cerebro-maquina se han convertido en un método de comunicación alternativo que sustituye a los métodos tradicionales basados en manejar un ratón o teclado para realizar acciones de control. Con estas interfaces, las personas con problemas de movilidad permanentes o que han sufrido un accidente y se encuentren en periodo de recuperación son capaces de comunicarse con su entorno [3], [6]. Mediante el uso de una interfaz cerebro-máquina (Brain-Machine Interface, BMI) es posible registrar la actividad bioeléctrica del cerebro a través de electrodos, permitiendo así el control cerebral de un dispositivo [4], [5].

Existen varios tipos de técnicas para registrar la actividad cerebral pudiendo dividirse en: técnicas invasivas y técnicas no invasivas. Las técnicas invasivas consisten en implantar microelectrodos en el córtex cerebral para medir la actividad eléctrica de las neuronas. Sin embargo, la necesidad de una operación quirúrgica y los problemas éticos que ello conlleva son obstáculos muy importantes a la hora de desarrollar este tipo de técnica. Por el contrario, existen técnicas no invasivas que adquieren señales electroencefalográficas (EEG) a través de electrodos repartidos sobre la superficie de la cabeza. Dichos electrodos adquieren las señales cerebrales, que se procesan y se clasifican para obtener los parámetros de control. Esta técnica ya ha sido empleada para estudiar el movimiento de un brazo robótico [2], [8].

Figura1: Sujeto realizando los registros EEG sobre la cinta de andar.

Estudios recientes muestran que existe una correlación directa entre señales

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

electroencefalográficas (EEG) y parámetros cinemáticos de brazos y piernas [1], [7]. A pesar de que estas técnicas no consiguen la exactitud de las técnicas invasivas, permiten a las personas con movilidad reducida interactuar con mecanismos que facilitan su rehabilitación sin necesidad de otros medios. En el caso del miembro inferior, procesando la información cerebral obtenida de las señales EEG (Figura 1) el objetivo es generar los parámetros necesarios para mover un exoesqueleto y además saber en qué estado de la marcha humana se encuentra el sujeto y qué movimiento desea hacer a continuación.

En este trabajo, se ha estudiado el estado de la marcha humana en el que se encuentra el sujeto a partir de la decodificación de la cinemática de la pierna. Para ello se han realizado registros de las señales EEG y del ángulo de la rodilla para un posterior procesado y creación de un modelo de decodificación. Los registros se han realizado a voluntarios sanos, caminando a una velocidad concreta (2 km/h) sobre una cinta de andar. El trabajo se encuadra dentro del proyecto Biomot - Smart Wearable Robots with Bioinspired Sensory-Motor Skills (IFP7-ICT- 2013-10-611695) cuyo objetivo principal es el desarrollo de un robot-exoesqueleto para tareas de rehabilitación del miembro inferior controlado por una interfaz cerebral.

En el resto de este documento se explica la metodología y material utilizado (sección 2), se muestran y discuten los resultados obtenidos (sección 3) y finalmente se describen las principales conclusiones que se obtienen de este estudio (sección 4).

2 METODOLOGÍA

2.1 PROCESO EXPERIMENTAL

Tres voluntarios sanos, con edades comprendidas entre 22 y 28 (25.7±4.0) años, han caminado a 2 km/h por una cinta de andar mientras se registran sus señales EEG y los ángulos de sus piernas simultáneamente durante rondas de 1 minuto, repitiendo dicha actividad 7 veces por cada sujeto y sesión, con una pequeña pausa entre repeticiones (Figura 1). Se ha realizado una sesión por usuario. Todas estas repeticiones se han realizado concentrándose en realizar una marcha normal y en una habitación en silencio.

2.2 REGISTROS

Las señales han sido registradas utilizando el amplificador comercial g.USBamp de la compañía g.Tec con g.GAMMAcap el cual tiene electrodos activos que reducen la presencia de ruido en la señal. Las señales EEG se registran usando 32 electrodos en las posiciones Fz, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6, C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6, P3, P1, Pz, P2, P4, PO7, PO3, POz, PO4, PO8 de acuerdo con el Sistema Internacional 10/10 (Figura 2).

Las señales registradas son preprocesadas con dos filtros: un filtro paso-bajo de 100 Hz y un filtro Notch a 50 Hz para eliminar el ruido que se produce por interferencias eléctricas. Por otro lado, los ángulos de la rodilla se registran utilizando un sistema de sensores inerciales que se sitúan sobre las piernas (TECH MCS, Technaid).

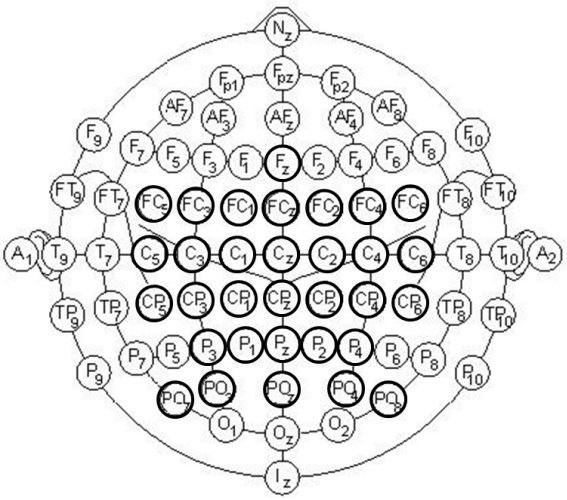


Figura 2: Posición de los electrodos siguiendo el Sistema Internacional 10/10.

Tras realizar el preprocesamiento de las señales se realiza un filtrado de media móvil tanto de las señales EEG como de los registros de las IMUs, en el cual, para cada instante, se toma un intervalo de los *P* valores anteriores y se calcula la media. Este proceso tiene como objetivo suavizar las dos señales debido a que únicamente se va a evaluar una tendencia del ángulo de la rodilla a incrementarse o disminuirse. El valor de *P* escogido es 200.

2.3 MODELO DE DECODIFICACION

Una vez registradas las señales EEG, se ha realizado una regresión linear multidimensional de acuerdo con la siguiente formula:

$$x[t] = a + \sum_{n=1}^{N} \sum_{k=0}^{L} b_{nk} S_n[t-k] \qquad (1)$$

donde *x* es el ángulo registrado en el instante *t* y *Sn* es el voltaje medido en el electrodo *n*. En cuanto a

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

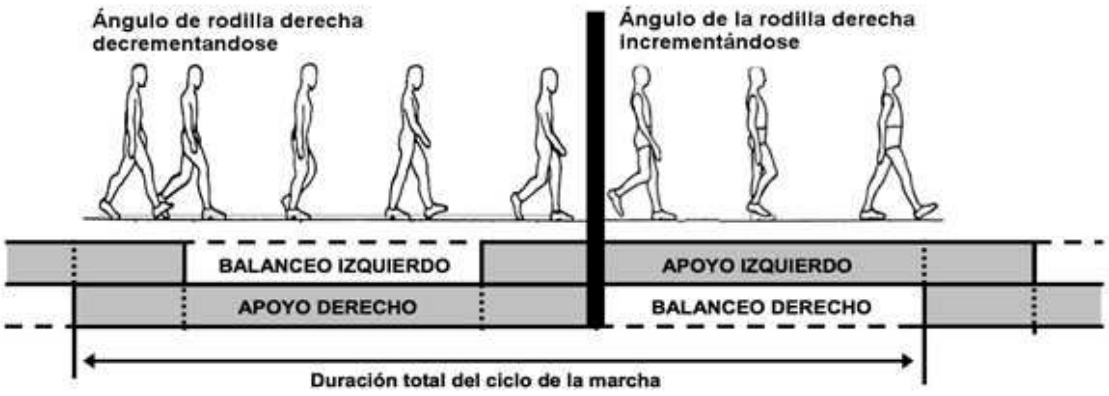


Figura 3. Estados principales de la marcha humana y variación del ángulo de la pierna derecha.

los demás parámetros, *L* es el número de lags, *N* el número de canales y *a* y *b* los parámetros de decodificación.

Esta fórmula puede simplificarse de forma matricial quedando de la siguiente forma:

$$X[1\times 1] = A[1\times NF] * Z[NF\times 1] + R[1\times 1] \quad (2)$$

donde *X* es el ángulo de la rodilla, *A* es la matriz de transformación, *Z* es el vector de parámetros, *R* es la matriz de escalado (término independiente de la regresión linear) y *NF* es el número de parámetros usados, que depende del parámetro *L* (lags) y del número de canales *N* (*NF=L*N+1*). Para este estudio, se han empleado 10 lags (*L=10*) que corresponden a aproximadamente 80 ms de información cerebral.

2.4 MODELO DE MARCHA HUMANA

La marcha humana se divide en dos fases fundamentales (Figura 3): la fase de apoyo, en la que la pierna está apoyada en el suelo, y la fase de balanceo, en la cual la pierna se encuentra en el aire. Estas dos fases se basan sólo en el movimiento de una pierna, independientemente de la fase en la que se encuentre la otra.

El algoritmo empleado para dividir en las dos fases tanto los ángulos registrados por las IMUs como los ángulos decodificados de las señales EEG se basa en la comparación entre dos muestras en el proceso de la marcha. Realizando la comparación de dos muestras del ángulo de la parte posterior de la rodilla derecha (Figura 4) es posible saber en qué estado de la marcha se encuentra el sujeto. Si el ángulo está incrementándose, el sujeto se encontrará en la fase de balanceo. Si el ángulo está disminuyendo, se considera que está en la fase de apoyo.

Figura 4: Ángulo registrado por la IMU disminuyendo durante la fase de apoyo.

No obstante, debido al ruido de la señal decodificada la tendencia del ángulo a aumentar o disminuir es difícil de detectar con precisión. Por ello se realiza un filtro de media móvil tomando *P* muestras de los *P* instantes anteriores y realizando la media. La nueva señal filtrada permite obtener una clasificación mucho más precisa.

2.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para obtener la efectividad de la decodificación se ha procedido a aplicar el modelo de regresión lineal mediante una validación cruzada entre los 7 registros realizados con los 3 voluntarios, reconstruyendo así el ángulo de la rodilla derecha y obteniendo el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

coeficiente de correlación de Pearson entre ambas señales.

Posteriormente, se ha aplicado un algoritmo para dividir tanto el ángulo de rodilla reconstruido como el ángulo real obtenido de los sensores inerciales en las dos fases principales de la marcha humana y se ha obtenido el porcentaje de coincidencia de ambas reconstrucciones.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la decodificación del ángulo de rodilla y la clasificación de los estados de apoyo y balanceo de la marcha. Como se ha comentado, se ha reconstruido el ángulo de la rodilla derecha y posteriormente se dividido en dos estados: apoyo y balanceo, comparando los resultados con los ángulos reales medidos a través de los sensores inerciales.

3.1 RESULTADOS DE LA DECODIFICACIÓN

En la Figura 5 se puede ver un ejemplo de ángulo de rodilla real frente al ángulo de rodilla decodificado. Ambas señales están estandarizadas y suavizadas mediante un filtro de media de acuerdo a la metodología planteada (ver Sección 2). Como se puede observar, a pesar de que las amplitudes difieren, la tendencia de la señal es muy similar, lo que permite evaluar con más precisión la señal a la hora de clasificar los dos estados de la marcha planteados, puesto que dependen de la pendiente de la señal y no de su amplitud.

Tabla 3: Coeficientes de correlación de Pearson de las señales decodificadas.

Iteración	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
1	0,63	0,50	0,36
2	0,55	0,62	0,44
3	0,48	0,68	0,49
4	0,44	0,62	0,53
5	0,46	0,50	0,56
6	0,39	0,64	0,47
7	0,45	0,71	0,45
Media±STD	0,49±0,08	0,61±0,08	0,47±0,07

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para todos los usuarios al obtener el coeficiente de correlación de Pearson entre el ángulo real de rodilla y el decodificado para cada una de las siete iteraciones. Cabe destacar que la desviación estándar obtenida es menor del 0,1 en todos los casos, lo que indica que el modelo de decodificación es muy estable. Los valores de decodificación son, asimismo, cercanos al 0,5 o incluso superiores, lo que indica una fuerte relación entre ambas señales.

3.2 RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE LAS FASES DE LA MARCHA

Una vez obtenido el ángulo de rodilla decodificado, se ha procedido a discretizar tanto el ángulo real como el decodificado en los dos estados de la marcha (balanceo y apoyo) de acuerdo al algoritmo planteado en este trabajo y se ha obtenido la tasa de acierto de la señal decodificada frente a la señal original. En la Figura 6 se muestra un ejemplo del ángulo de rodilla y la discretización del mismo en los estados de apoyo y balanceo. Por su parte, en la Figura 7 se puede observar el ángulo de la rodilla decodificado y la discretización del mismo en los estados de apoyo y balanceo.

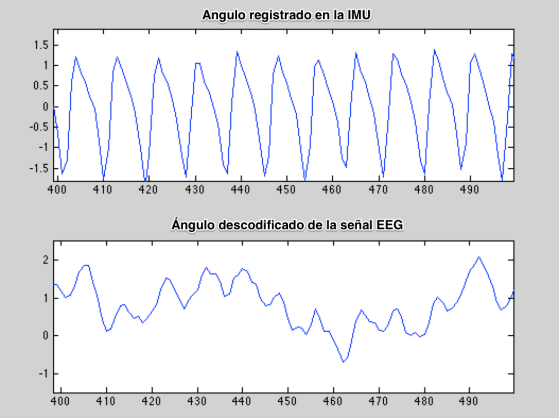


Figura 5: Comparación entre ángulo de rodilla real (arriba) y el ángulo decodificado (abajo).

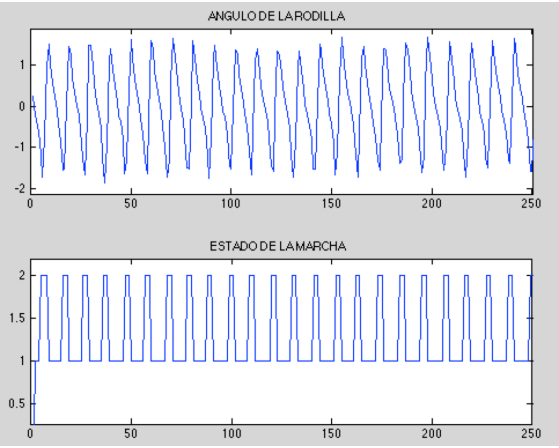


Figura 6: Clasificación de los estados de la marcha (abajo) en función del ángulo registrado (arriba). (1-apoyo y 2-balanceo).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

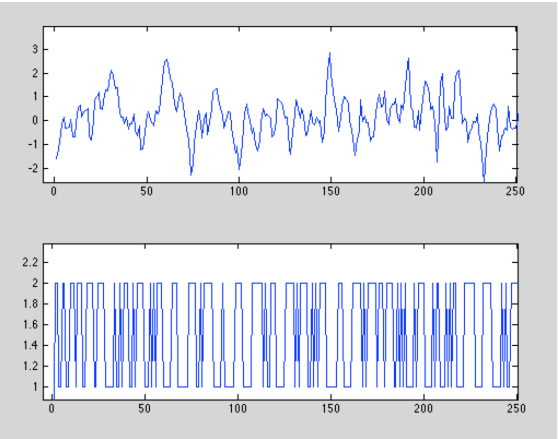


Figura 7: Clasificación de los estados de la marcha (abajo) en función del ángulo decodificado (arriba). (1-apoyo y 2-balanceo).

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 4. Los resultados de clasificación son muy superiores a la aleatoriedad (en este caso, para dos estados, teóricamente un 50%), llegando a superar el 70% en el caso del usuario 2. Es importante destacar que la desviación entre iteraciones es apenas superior al 2%, lo que indica de nuevo que el modelo de decodificación es muy estable y que el método de discretización mejora aún más esa estabilidad.

Tabla 4: Tasa de acierto (%) en la clasificación de fases de la marcha para los parámetros óptimos

Iteración	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3
1	68,04	68,62	68,04
2	67,45	72,73	65,98
3	65,98	74,78	65,99
4	63,05	74,19	66,86
5	67,74	73,02	69,80
6	62,17	75,95	71,55
7	60,41	72,43	67,74
Media±STD	64,98±3,07	73,1±2,34	67,99±2,06

4. CONCLUSIONES

En este estudio se ha analizado una metodología para decodificar y clasificar la fase de la marcha humana a partir de componentes EEG de baja frecuencia. Se han distinguido dos fases: apoyo y balanceo. Para obtener la fase de marcha, se ha decodificado el ángulo de rodilla y posteriormente se ha analizado la tendencia del ángulo para obtener cada uno de los estados de la marcha.

Los resultados obtenidos muestran una gran correlación entre los ángulos decodificados de las señales cerebrales y los ángulos registrados de la rodilla derecha de los 3 sujetos estudiados y además una tasa de acierto en la clasificación de los estados de la marcha de aproximadamente el 70%, con una desviación del 2%. Estos resultados sugieren que es posible diferenciar entre las fases de apoyo y balanceo de la marcha humana a través de las señales cerebrales registradas mediante electrodos de forma no invasiva, lo que nos permitiría su posterior empleo en su aplicación a exoesqueletos para personas con discapacidad durante el proceso de rehabilitación.

En futuros trabajos, se procederá a registrar más ángulos de todas las articulaciones inferiores para así poder determinar en qué estado más específico de la marcha humana se encuentra el sujeto, además de realizar una clasificación en tiempo real. Además, se buscará evaluar la efectividad del método propuesto, así como implementar mejoras en los algoritmos empleados.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Comisión Europea en el marco del proyecto BioMot - Smart Wearable Robots with Bioinspired Sensory-Motor Skills (IFP7-ICT- 2013-10-611695) y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana a través de la ayuda VALi+d ACIF/2012/135.

Referencias

[1] Bradberry, T. J., Gentili, R. J., Contreras-Vidal, J. L., (2010) "Reconstructing three-dimensional hand movements from non-invasive electroencephalographic signals," *The Journal of Neuroscience*, vol. 30(9), pp. 3432-3437.

[2] Carmena, J. M., et al., (2003) "Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates," *PLoS Biology*, vol. 1(2), p. E42.

[3] Hochberg, L. R., et al., (2006) "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia", *Nature*, vol. 442, pp. 164-171.

[4] Iáñez, E., Azorín, J. M., Úbeda, A., Ferrández, J. M., Fernández, E., (2010) "Mental tasks-based brain-robot interface", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58(12), pp. 1238-1245.

[5] Inoue, S., Akiyama, Y., Izumi, Y., Nishijima, S., (2008) "The development of BCI using alpha waves for controlling the robot arm", *IEICE Transactions on Communications*, vol. 91(7), pp. 2125-2132.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[6] Kim, S. P., Simeral, J. D., Hochberg, L. R., Donoghue, J. P., Friehs, G. M., Black, M. J., (2011) "Point-and-click cursor control with an intracortical neural interface system by humans with tetraplegia", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 19(2), pp. 193-203.

[7] Presacco, A., Forrester, L. W., Contreras-Vidal, J. L., (2012) "Decoding lower-limb intra and inter-limb coordination during treadmill walking from scalp EEG signals", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 20(2), pp. 212-219.

[8] Velliste, M., Perel, S., Spalding, M. C., Whitford, A. S., Schwartz, A. B. T., (2007) "Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding," *Nature*, vol. 453, pp. 1098-1101.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

APLICACIÓN DE ICA PARA LA ELIMINACIÓN DE ARTEFACTOS OCULARES Y MANDIBULARES EN SEÑALES EEG DURANTE LA REALIZACIÓN DE TAREAS MENTALES

Belén López, Andrés Úbeda, Daniel Planelles, Carlos Perez-Vidal, Eduardo Iáñez and José M. Azorín
Brain-Machine Interface Systems Lab, Universidad Miguel Hernández
Ed. Innova, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante)
Email de contacto: aubeda@umh.es

Resumen

La presencia de artefactos es un serio problema a la hora de hacer interpretaciones y análisis de los datos EEG, ya que dichos artefactos interfieren en la señal y pueden enmascarar la información útil que se desea procesar. El método de análisis de componentes independientes (ICA) permite separar las señales EEG en sus distintas componentes para poder eliminar la contribución de estos artefactos. En este trabajo se presenta la aplicación del método ICA en registros EEG basados en pensamientos motores voluntarios. Se ha efectuado una clasificación de dos tareas mentales antes y después de aplicar ICA para mostrar sus posibilidades de aplicación en interfaces cerebro-computador.

Palabras Clave: ICA, Artefactos, EEG.

1. INTRODUCCIÓN

Las interfaces cerebro-computador (Brain-Computer Interface, BCI) son un conjunto de sensores y componentes de procesamiento de señales que permiten adquirir y analizar las actividades cerebrales con la finalidad de establecer un canal de comunicación fiable directamente entre el cerebro y un dispositivo externo [8].

Las interfaces cerebrales no invasivas procesan las señales electroencefalográficas (EEG) registrándolas por medio de electrodos que captan las variaciones eléctricas producidas en la corteza cerebral [5]. Durante estas mediciones se pueden generar una serie de interferencias involuntarias por parte del usuario, conocidas como artefactos. Estos artefactos están generalmente relacionados con movimientos oculares o musculares involuntarios. La presencia de artefactos añade ruido en la señal y por tanto empeora los resultados de clasificación.

Para evitar los efectos adversos de estas interferencias, se han investigado varios métodos para eliminar artefactos en EEG [2, 3, 14]. De todos los existentes, este estudio se centra en ICA (*Independent Component Analysis*). Debido a su capacidad de descomponer las señales EEG en actividades cerebrales funcionalmente independientes y en otras actividades no neuronales, ICA ha sido ampliamente aplicado para mejorar la relación señal-ruido (SNR) de las señales de EEG relacionadas con los sistemas BCI [6].

En este trabajo se va a analizar la aplicación de ICA en la clasificación de tareas motoras. Primero se expondrá que son los artefactos y cómo interfieren en la señal. Se explicará el método ICA en el caso del procesamiento de señales EEG. Finalmente se terminará con la arquitectura del sistema utilizado y qué resultados se obtienen al hacer uso del método ICA en dicho proceso. El trabajo se encuadra dentro del proyecto Brain2Motion (DPI2011-27022-C02-01) cuyo objetivo principal es el desarrollo de un robot-exoesqueleto/prótesis neuro-motora para tareas de rehabilitación del miembro superior en pacientes con ictus.

2. ARTEFACTOS EN EEG

En EEG, un artefacto se define como cualquier potencial eléctrico que no se origina en el cerebro. Se pueden encontrar dos tipos básicos de artefactos, los de origen fisiológico, generados por parte del paciente debido al funcionamiento normal del cuerpo, y los de origen no fisiológico debido al ruido ambiente y la maquinaria utilizada para la toma de medidas [11].

Los artefactos de origen fisiológico suelen ser debidos al movimiento y parpadeo de ojos, la respiración, el movimiento de la lengua, los potenciales de la piel, el temblor del cuerpo, la actividad cardíaca, la actividad muscular, las

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

glándulas sudoríparas, el pulso en los tejidos o los marcapasos; mientras que los artefactos de origen no fisiológico suelen estar dados por un mal registro de la señal, la interferencia eléctrica de la línea (50/60Hz), los electrodos, los diferentes tipos de equipos médicos, la iluminación o el movimiento en el entorno.

La influencia de los artefactos de origen no fisiológico puede reducirse en gran medida, pero no tanto los fisiológicos. Por ello, la mayor parte de los algoritmos existentes están destinados a eliminar o evitar la presencia de estos artefactos en los datos EEG [8]. En este caso, se ha decidido eliminar los artefactos producidos por los parpadeos y los movimientos mandibulares ya que son los más comunes en los registros EEG.

3. ICA EN EL PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES EEG

ICA es un método estadístico cuyo objetivo es encontrar las proyecciones lineales de los datos observados que maximicen su independencia mutua.

En el procesamiento de las señales EEG, ICA ha demostrado tener buena capacidad separando las señales EEG en fuentes funcionalmente independientes, como las componentes neuronales procedentes de diferentes áreas del cerebro y las componentes de los artefactos atribuidos a los movimientos de los ojos, parpadeos, músculos, corazón y ruidos lineales. Debido a sus ventajas en la separación en origen de EEG, el método ICA se ha aplicado con éxito en las investigaciones de EEG para reducir artefactos, mejorar la relación señal-ruido y para facilitar la localización de la fuente EEG [9].

3.1 CONCEPTO DE ICA

Dado un modelo de mezcla lineal, la señal EEG de n-canales, $x = [x_1 x_2 \dots x_n]$ es generada por m fuentes independientes $s = [s_1 s_2 \dots s_m]$:

$$x = As$$

donde A es una matriz de $n \times m$ del modelo. La tarea consiste en recuperar una versión, $u = Wx$, de la fuente original, s, idénticas excepto por la escala y la permutación, mediante la búsqueda de una matriz cuadrada W especificando filtros espaciales que invierten el proceso de mezcla lineal [10].

Por tanto ICA intenta identificar la matriz W tal que:

$$W \approx A^{-1}$$

Por lo que la matriz resultante u es:

$$u = Wx = W(As) = s' \approx s$$

La única exigencia para el correcto funcionamiento de ICA es que las señales originales, s, sean en cualquier instante de tiempo t estadísticamente independientes y la mezcla de las fuentes sea lineal [11].

3.2. APLICACIÓN DE ICA A TRAVÉS DE EEGLAB

Para la aplicación del método ICA, se va a utilizar la herramienta EEGLAB, entorno de software de código abierto para Matlab disponible de forma gratuita, proporcionado por SCCN (*Swartz Center for Computational Neuroscience*).

En cuanto a la utilización del programa, se han seguido los pasos expuestos en el tutorial propuesto por SCCN [13]. El programa EEGLAB se utiliza una vez que se tiene la señal EEG. En él se pueden introducir los datos con distintas extensiones, por lo que se ha decidido proporcionar la señal en una estructura de Matlab. Además se añade un archivo con las localizaciones de los electrodos, definido en el propio programa siguiendo el tutorial y se especifica la frecuencia de muestreo. Llegado este punto y después de haber guardado los datos, se puede ver la señal separada por electrodos (Figura 4) donde se observa, en ciertos casos, que la señal es interferida por artefactos.

El siguiente paso es ejecutar ICA, proceso que lleva un par de minutos, dependiendo del tamaño de los datos. Una vez hecho, se pasa a la fase de eliminación de artefactos. Para ello, se ha seguido el método de eliminación basado en la inspección visual de cada componente por separado (Figura 1).

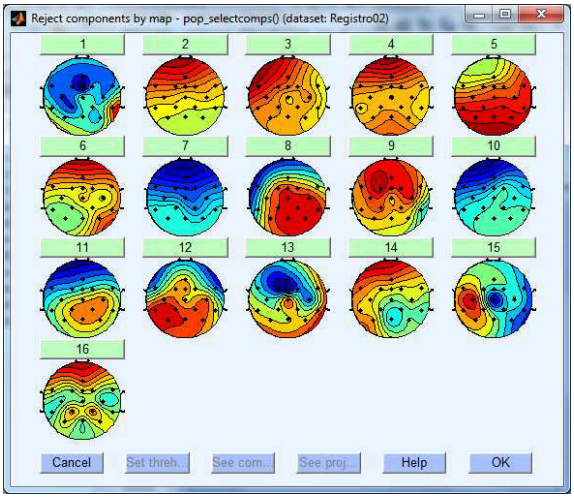


Figura 1: Ventana de eliminación mediante *"Reject component by map"* de EEGLAB.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

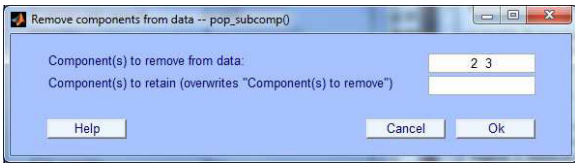


Figura 2: Ventana de confirmación de eliminación "*Remove components from data*" de EEGLAB.

Una vez decididos cuales son las componentes a eliminar, se selecciona la ventana con dicho nombre (Figura 2) y se introduce el número de las componentes que se desea rechazar.

Llegados a este punto hay que guardar y exportar los datos en un archivo de texto, que puede ser cargado en el programa Matlab.

4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La interfaz cerebral implementada para este trabajo está compuesta por un sistema no invasivo. Las señales EEG se registran utilizando el gorro GammaCap de g.Tec a través de 16 electrodos activos. En la figura 3 se pueden observar los electrodos usados. La distribución de dichos electrodos es la siguiente: Fz, FC5, FC1, FCz, FC2, FC6, C3, Cz, C4, CP5, CP1, CP2, CP6, P3, Pz y P4, de acuerdo al sistema internacional 10/10 [6]. Esta interfaz cerebral ya ha sido utilizada en trabajos anteriores [13].

4.1 PROCESAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE LAS SEÑALES EEG

El procesamiento de la señal se realiza para obtener las características que van a ser utilizadas por el clasificador para distinguir las diferentes tareas mentales. En primer lugar, se aplica un filtro paso banda de 5 a 40 Hz para obtener las bandas que proporcionan más información acerca de la actividad mental a analizar. Después, se aplica un filtro laplaciano sobre las 16 señales. Este método se utiliza para mejorar la calidad de la señal. Por último, se hace uso de periodograma para estimar la densidad espectral de las señales.

El periodograma es una estimación de la Densidad Espectral de Potencia (DEP) que utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Este método es un estimador sesgado (a pesar de que el valor promedio del periodograma converge a la verdadera PSD, la varianza no disminuye a cero). Este procedimiento se aplica a la señal cada 500 ms usando los datos registrados de un segundo de

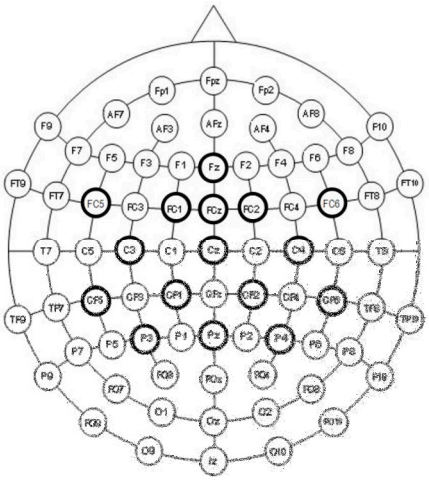


Figura 3: Distribución de electrodos de la interfaz cerebral según el sistema internacional 10/10.

duración (se produce un solapamiento de 500 ms en los datos a clasificar). Los valores de potencia espectral utilizados para la clasificación son las frecuencias entre 8 y 36 Hz, con una resolución de 1 Hz. Por lo tanto se utilizan 464 características (29 por cada electrodo).

El clasificador utilizado en el análisis descrito en este trabajo está basado en Máquinas de Vectores de Soporte (*Support Vector Machine*, SVM). Estos sistemas son muy útiles en la clasificación de los datos. SVM hace uso de un hiperplano o un conjunto de ellos en un espacio dimensional muy alto (incluso infinito) para distinguir las diferentes clases a clasificar. La precisión de los clasificadores basados en SVM depende del núcleo utilizado y sus parámetros. En los sistemas BCI, generalmente se usa un núcleo Gausiano o una función de base radial (*Radial Base Function*, RBF). En este caso se utiliza un núcleo RBF. Este tipo de núcleo tiene dos parámetros importantes a configurar: el parámetro de regulación (C) y γ, el cual determina el tamaño del núcleo. El valor de dichos parámetros es establecido teniendo en cuenta estudios previos de las configuraciones de este clasificador [4, 5]. Para este estudio, los valores son C = 512 y $\gamma = 0{,}002$.

4.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación de ICA, se han tomado registros de cuatro usuarios (tres varones y una mujer, usuario 1) con edades comprendidas entre los 23 y los 28 años (25.75±2.63), todos diestros y sin ningún problema ni discapacidad física. Se han seleccionado dos tareas de las doce posibles, que proporcionan una mejor clasificación basándose en estudios previos [4], concretamente:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

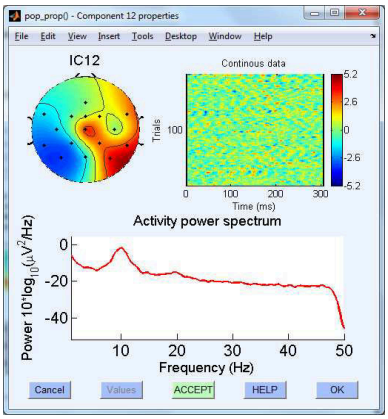


Figura 4: Ejemplo de la componente 12 del Usuario 1

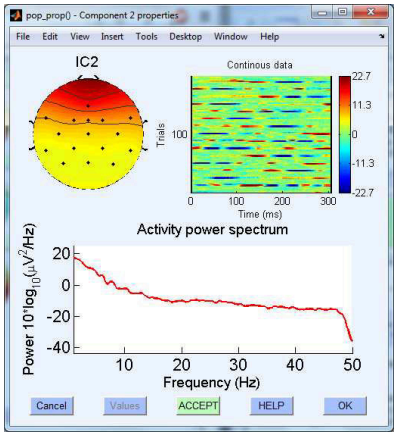


Figura 5: Ejemplo de la componente 2 del Usuario 1

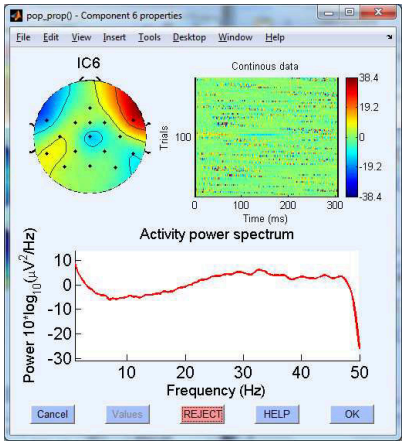


Figura 6: Ejemplo de la componente 6 del Usuario 1

1) Movimiento de la mano derecha (abrir/cerrar).
2) Recitar mentalmente el abecedario.

A continuación se han realizado pruebas de una duración de 4 minutos cada una, donde se le va pidiendo al usuario que realice una u otra tarea mental según va apareciendo una imagen en la pantalla. Primero se muestra una cruz durante 3 segundos. Esta aparece al principio de todos los ciclos de las tareas mentales y es utilizado por el usuario para relajarse. Después, se muestra una imagen representativa de la tarea a desempeñar durante 2 segundos. Finalmente se establece un periodo de 10 segundos donde se lleva a cabo la tarea mental expuesta [4].

En total se han realizado 16 pruebas por usuario. Para poder comprobar la interferencia de los artefactos se han realizado 4 pruebas de forma normal, 4 pruebas realizando parpadeos cada dos segundos, 4 pruebas realizando movimientos mandibulares cada dos segundos y 4 realizando conjuntamente parpadeos y movimientos mandibulares intercalándolos cada dos segundos.

En la figura 7 se puede observar las señales obtenidas para cada uno de los tipos de prueba. Después aplicamos ICA indicando la frecuencia de muestreo que en este caso es 256 Hz. El programa separa la señal en las diferentes componentes independientes.

Una buena componente es aquella que su espectro de potencia contiene un pico en 10 Hz ya que es donde se encuentra la banda de frecuencia alfa (8-13Hz) (Figura 4) [12, 1]. A su vez, los parpadeos se suelen encontrar a frecuencias bajas. Se caracterizan por un pico de unas décimas de segundo alrededor de 1 Hz (Figura 5). En cuanto a los movimientos mandibulares se encuentran en ráfagas a altas frecuencias. (Figura 6) [1].

Una vez se han diferenciado las componentes correspondientes a los artefactos, se han analizado todos los registros de los cuatro usuarios con ICA y se han eliminado los artefactos. Es recomendable no eliminar más del 10% de las componentes separadas [13], por lo que se ha decidido eliminar 2 componentes como máximo.

Una vez aplicado el método ICA de eliminación de artefactos, se han comparado los porcentajes de acierto para la clasificación de dos tareas producidos antes y después de la aplicación del método. Como se puede observar en la Tabla 1, los porcentajes de acierto para dos tareas mejoran en el 70% de los casos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

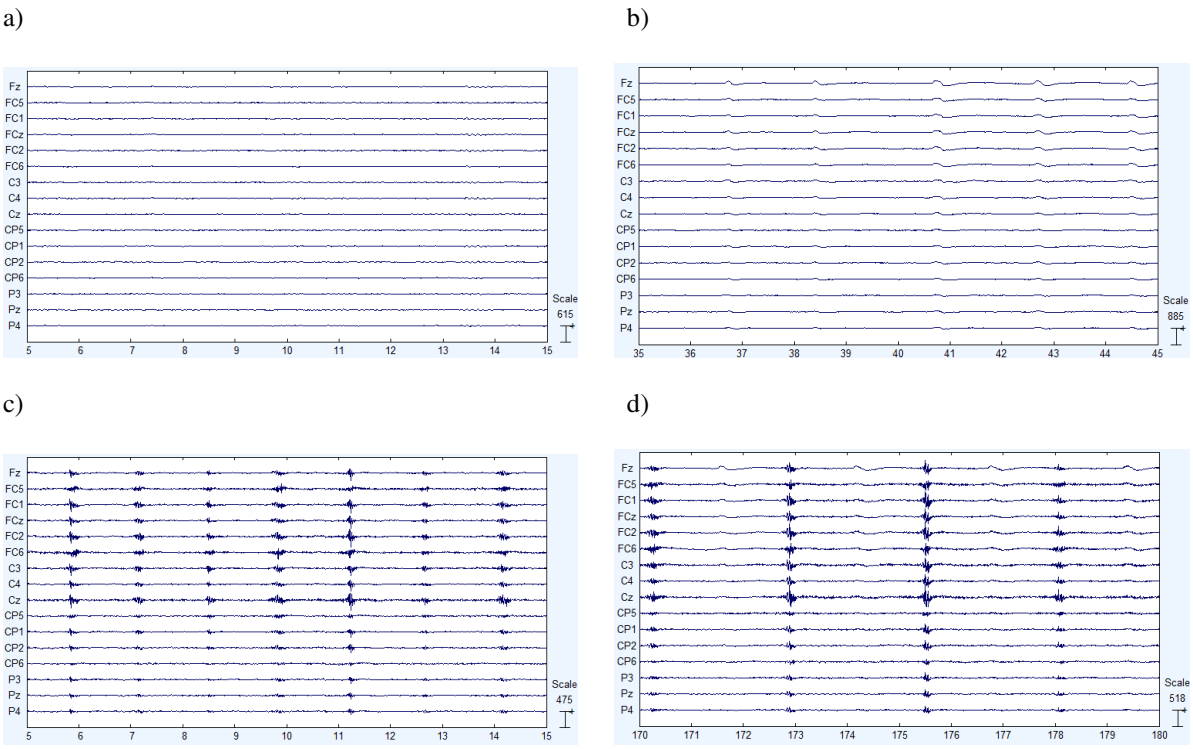


Figura 7: Señales separadas por electrodos. a) Registro normal. b) Registro con parpadeos. c) Registro con movimientos mandibulares. d) Registro con parpadeos y movimientos mandibulares.

Tabla 1: Porcentaje de aciertos de los cuatro usuarios en las distintas pruebas antes y después de procesar los datos con ICA.

Prueba		Normal	Parpadeos	Mandíbula	Parpadeo/Mand.
Usuario 1	**Sin ICA**	61.01 %	59.77 %	53.23 %	56.95 %
	Con ICA	60.84 %	58.28 %	**53.73 %**	**57.37 %**
Usuario 2	**Sin ICA**	72.60 %	77.15 %	63.99 %	62.58 %
	Con ICA	71.85 %	**77.24 %**	63.25 %	**63.58 %**
Usuario 3	**Sin ICA**	60.51 %	64.16 %	58.86 %	62.58 %
	Con ICA	**62.00 %**	**64.65 %**	**59.85 %**	61.67 %
Usuario 4	**Sin ICA**	54.72 %	57.62 %	59.77 %	57.62 %
	Con ICA	**55.46 %**	**57.62 %**	**60.35 %**	**59.69 %**

5. CONCLUSIONES

En este artículo se han analizado el uso de ICA para la eliminación de artefactos EEG. Para ello, se han evaluado registros de dos tareas mentales a los que se ha añadido interferencias producidas por movimientos oculares y mandibulares. Posteriormente, se han obtenido los resultados con dos tareas mentales mediante un clasificador SVM y se ha obtenido una mejora en la clasificación para el 70% de los registros.

En trabajos futuros, se pretende realizar esta eliminación de forma automática por medio de un programa que haga la elección sin necesidad de que el experimentador tenga que elegir manualmente que componentes deben ser eliminadas. Además, se investigará si dicho procedimiento es útil para el caso de los artefactos musculares que se dan al tomar medidas EEG durante la marcha humana.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto Brain2Motion, DPI2011-27022-C02-01 y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana de España a través de las ayudas VALi+d ACIF/2012/135 y FPA/2014/041.

Referencias

[1] "*Common ICA components*". http://www.nbtwiki.net/

[2] Delorme, A., Makeig, S., Sejnowski, T., "*Enhanced detection of artifacts in EEG data using high-order statistics and independent component analysis*", Neuroimage, vol. 34(4), pp. 1443-1449, 2007.

[3] García Arias, H. F., Alzate, S. L., J. Bestier Padilla, "*Detección y clasificación de Artefactos en señales EEG*", XIV Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial, 2009.

[4] Hortal, E., Úbeda, A, Iáñez, E., Planelles, D., Azorín, J.M., *"Online classification of two mental tasks using a SVM-based BCI system"*, IEEE EMBS Conference on Neural Engineering,, pp. 1307-1310, 2013.

[5] Iáñez, E., Azorín, J. M., Úbeda, A., Ferrández, J. M., Fernández, E., "*Mental Tasks-based Brain-robot Interface*", Robotics and Autonomous Systems, vol. 58, pp. 1238-1245, 2010.

[6] Jasper, H. H., "*The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation*", Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, vol. 10, pp. 371-375, 1999.

[7] Jung, T.-P., Makeig, S., Humphries, C., Lee, T.-W., Mckeown, M. J., Iragui, V., Sejnowski, T. J., *"Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation"*, Psychophysiology, vol. 37, pp. 163-178, 2000.

[8] Kachenoura, A., Albera, L., Senhadji, L., Comon, P.. "*ICA: A Potential Tool for BCI Systems*", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 25(1), pp. 57-68, 2008.

[9] Mozaffar, S., Petr, D. W., "*Artifact Extraction from EEG Data Using Independent Component Analysis*", Technical Report, University of Kansas, 2002.

[10] Quintero Rincón, A., Risk, M., Liberczuk, S., "*Preprocesamiento de EEG con Filtros Hampel*", IEEE Latin American Transactions, vol. 89, 2012.

[11] Tatum, W. O., Dworetzky, B. A., Schomer, D. L., "*Artifact and Recording Concepts in EEG*", Journal of Clinical Neurophysiology, vol. 28, pp. 252-263, 2011.

[12] Tejeiro Martínez, J., "*Electroencefalografía clínica básica; IV EEG Normal*", 2008.

[13] "Tutorial EEGLAB" http://sccn.ucsd.edu/wiki/EEGLAB_TUTORIAL_OUTLINE

[14] Wallstrom, G. L., Kass, R. E., Miller, A., Cohm, J. F., Fox, N. A., "*Automatic correction of ocular artifacts in the EEG: a comparison of regression-based and component-based methods*", International Journal of Psychophysiology, vol. 53(2), pp. 105-119, 2004.

[15] Wang, Y., Jung, T.-P., "*Improving Brain-Computer Interfaces Using Independent Component Analysis*", Towards Practical Brain-Computer Interfaces Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering, pp 67-83, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ESTIMACIÓN DE ALTURA EN APLICACIONES DE NAVEGACIÓN TOPOLÓGICAS MEDIANTE APARIENCIA GLOBAL DE INFORMACIÓN VISUAL

F. Amorós, L. Payá, D. Valiente, L.M. Jiménez, O. Reinoso
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n. 03202, Elche (Alicante), Spain
famoros@umh.es, lpaya@umh.es

Resumen

En este trabajo se presentan diferentes técnicas orientadas a la estimación de altura en aplicaciones de navegación visual. Todos los métodos descritos están basados en la apariencia global de las escenas. Las técnicas son analizadas usando nuestra propia base de imágenes, compuesta por un conjunto de escenas omnidireccionales capturadas en condiciones reales de iluminación, incluyendo distintas localizaciones y alturas. A partir de la información omnidireccional, usamos distintas representaciones de la escena, incluyendo las vistas panorámicas y ortográfica, y la proyección sobre la esfera unitaria. Los resultados experimentales demuestran la efectividad de los distintos métodos expuestos.

Palabras clave: Descriptor de apariencia global, navegación topológica, estimación de altura.

1. INTRODUCCIÓN

La riqueza de la información que los sistemas visuales proporcionan y las múltiples posibilidades de configuración que presentan los convierten en sensores muy utilizados en aplicaciones de robótica móvil. Entre las distintas posibilidades, nuestro trabajo se centra en visión omnidireccional. En la literatura es posible encontrar numerosos ejemplos que utilizan sistemas de visión omnidireccional en tareas de navegación, como [15].

Los trabajos clásicos de investigación en robótica móvil equipados con sensores visuales se centran en la extracción de características locales de las imágenes para obtener descriptores. Dichas marcas pueden ser naturales o artificiales. Como ejemplo, encontramos los descriptores SIFT [7] y SURF [2].

Por otro lado, también es posible encontrar técnicas que utilizan información visual en su conjunto para obtener descriptores. Estas técnicas, que utilizan la apariencia global visual, han demostrado buenos resultados en tareas de navegación 2D, tanto en localización como en estimación de la orientación. [5] y [11] incluyen algunos ejemplos.

Actualmente, los Vehículos Aéreos no Tripulados, más conocidos por sus siglas en inglés, UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) se están convirtiendo en una plataforma de navegación muy popular en el campo de la robótica móvil. En este sentido, es posible encontrar en [10] y [14] distintos trabajos que estudian el movimiento y pose de este tipo de vehículos usando sistemas visuales.

El propósito de este artículo es extender el uso de los descriptores de apariencia global a aplicaciones donde la altitud del robot cambia. Para este propósito, suponemos que el UAV no varía su inclinación respecto del eje z, que se corresponde con la dirección perpendicular al plano del suelo. En particular, se estudia la capacidad de estimar la altura relativa entre dos escenas usando descriptores de apariencia global.

Los algoritmos presentados en este trabajo han sido probados usando nuestra propia base experimental, compuesta por distintas imágenes adquiridas con un sistema de visión catadióptrico, formado por un espejo hiperbólico y una cámara.

A partir de las escenas omnidireccionales, es posible obtener distintas proyecciones. Específicamente, en este trabajo se hace uso de la imagen panorámica, la vista ortográfica, y la proyección sobre la esfera unitaria. Los descriptores usados y las técnicas de estimación de la altura son dependientes de la proyección utilizada.

El resto del trabajo está estructurado de la siguiente forma: La sección 2 presenta los descriptores de apariencia global empleados para representar la información visual de forma compacta. La siguiente sección introduce las distintas técnicas usadas para estimar la altura relativa de dos imágenes adquiridas en un mismo punto del plano del suelo. En la sección 4 se describe la base de imágenes usada en la parte experimental. La sección 5 recoge los resultados experimentales, y por último, las principales conclusiones y trabajo futuro se presentan en la sección 6.

2. DESCRIPTORES DE APARIENCIA GLOBAL

En esta sección se describen tres técnicas para extraer la información más relevante de imágenes con el propósito de construir un descriptor. Todas ellas están

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

basadas en la apariencia global de las escenas. Los descriptores se obtienen procesando las imágenes en su conjunto, evitando la segmentación o extracción de puntos característicos de la escena.

Una propiedad común de todos estos descriptores es que, tras definir sus parámetros, se componen por un número de elementos fijo. La distancia imagen, que proporciona información de la similitud entre dos escenas distintas, queda definida en nuestro trabajo como la distancia Euclídea entre dos descriptores.

Específicamente, los tres descriptores se basan en la representación de la información visual en el dominio de la frecuencia, haciendo uso de la Transformada de Fourier.

2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER

La Firma de Fourier se encuentra definida en [9]. En dicho trabajo se demuestra que es posible representar una imagen usando la Transformada Discreta de Fourier de cada una de las filas de la escena. Por tanto, la secuencia de valores $\{a_n\} = \{a_0, a_1, \ldots, a_{N-1}\}$ de cada fila de una imagen queda representada en el espacio de la frecuencia mediante la secuencia de números complejos $\{A_n\} = \{A_0, A_1, \ldots, A_{N-1}\}$:

$$\{A_n\} = \mathcal{F}[\{a_n\}] = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, \ldots, N-1. \tag{1}$$

Aprovechando las propiedades de la Transformada de Fourier, utilizamos únicamente los primeros coeficientes de cada transformada para representar cada fila, ya que la información más relevante se concentra en los elementos asociados con las frecuencias más bajas. Además, cuando se se aplica sobre escenas panorámicas, el módulo de los coeficientes de la transformada son invariantes a cambios de la orientación del robot en el plano del suelo.

2.2. TRANSFORMADA DE FOURIER 2D

A partir de los valores discretos $f(x,y)$ de una imagen digital con N_y filas y N_x columnas, la Transformada de Fourier 2D se define como:

$$\mathcal{F}[f(x,y)] = F(u,v) = \\ = \frac{1}{N_y} \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} f(x,y) e^{-2\pi j\left(\frac{ux}{N_x} + \frac{vy}{N_y}\right)}, \\ u = 0, \ldots, N_x - 1, v = 0, \ldots, N_y - 1. \tag{2}$$

Los componentes de la transformada son números complejos, que pueden dividirse en dos matrices: una con los valores de su magnitud, y otra con los argumentos de cada valor complejo. La información más relevante se encuentra concentrada en las frecuencias más bajas. En este caso, el Teorema del Desplazamiento se define como:

$$\mathcal{F}[f(x-x_0, y-y_0)] = F(u,v) \cdot e^{-2\pi j\left(\frac{ux_0}{N_x} + \frac{vy_0}{N_y}\right)}, \\ u = 0, \ldots, N_x - 1, v = 0, \ldots, N_y - 1. \tag{3}$$

La magnitud de los valores de la transformada de una imagen panorámica permanecen invariantes respecto de la orientación de captura de la escena. Cabe destacar que, es este caso, el argumento de los coeficientes de la transformada sufrirán variación tanto por desplazamiento de las filas, como por desplazamiento de las columnas de la imagen.

2.3. TRANSFORMADA ESFÉRICA DE FOURIER

Las información visual omnidireccional puede ser proyectada sobre una esfera de radio unidad. Consideramos $\theta \in [0, \pi]$ el ángulo de altitud, y $\phi \in [0, 2\pi)$ el ángulo acimut. La proyección de una imagen omnidireccional sobre la superficie esférica de dicha esfera puede ser expresada como función de estos dos ángulos, $f(\theta, \phi)$. En [6], sus autores demuestran que las funciones armónicas esféricas Y_{lm} forman una base ortonormal completa sobre la esfera unitaria. Cualquier función de cuadrado integrable definida sobre la esfera $f \in L^2(s^2)$ puede ser representada utilizando la expansión armónica esférica como:

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} \widehat{f}_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi), \tag{4}$$

con $l \in \mathbb{N}$ y $m \in \mathbb{Z}$, $|m| \leq l$. $\widehat{f}_{lm} \in \mathbb{C}$ denota los coeficientes armónicos esféricos, y Y_{lm} la función armónica esférica de grado l y orden m definida como:

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos\theta) e^{im\theta}, \tag{5}$$

donde $P_l^m(x)$ son las funciones asociadas de Legendre.

3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE ALTURA

En esta sección se detallan distintos métodos orientados a la obtención de estimadores de altura topológicos. Todas las técnicas incluidas proporcionan información de la dirección y magnitud del desplazamiento vertical topológico de un robot utilizando únicamente información visual. La información visual de la que se parte son escenas omnidireccionales, a partir de las cuales se extraen distintas proyecciones, que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

varían según el método de estimación de altura. Con el propósito de calibrar el sistema visual y obtener las distintas proyecciones de las escenas, se ha usado la librería de Matlab *OCamCalib* [12].

3.1. CORRELACIÓN DE LA CELDA CENTRAL DE IMÁGENES PANORÁMICAS

En el campo de navegación visual, es posible encontrar numerosas referencias que utilizan imágenes panorámicas como información de partida, como por ejemplo [4].

En una imagen panorámica, la información más distintiva suele situarse en las filas centrales de la escena, especialmente en ambientes de exterior. Además, si se produce un cambio en la altura de la cámara, tanto hacia arriba como hacia abajo, esta área es la menos susceptible de caer fuera del ángulo de visión del sistema visual.

Tomando todo esto en cuenta, se propone una técnica que compare las filas central entre imágenes para obtener una medida de su altura relativa. Para ello, el algoritmo calcula el descriptor de una celda que incluye las filas centrales de una imagen, y repite este proceso para celdas situadas inmediatamente por encima y por debajo de la celda central. En la Figura 1 se representa un ejemplo de imagen panorámica y distintas celdas seleccionadas. La celda central está destacada con una linea de mayor grosor, y podemos apreciar las celdas adicionales.

Figura 1: Celdas seleccionadas sobre la imagen panorámica.

Si llega una nueva imagen capturada en el mismo punto (x,y) del suelo, y queremos calcular su altura de forma relativa a la primera imagen, calculamos el descriptor de su celda central, y estimamos la distancia imagen entre esta celda y todas las celdas de la primera imagen.

Tras realizar todas las comparaciones, seleccionamos el caso que presenta una menor distancia imagen, ya que denota la mayor similitud entre escenas. La altura (d) asociada a la celda seleccionada de la primera imagen proporciona información del desplazamiento vertical relativo de ambas escenas. Esta distancia d, medida en píxeles, representa el estimador de altura relativa.

3.2. DESFASE VERTICAL DE LA FFT2D

Tal y como se comenta en la sección 2.2, la transformada de Fourier 2D nos permite detectar cambios en el orden de las filas y las columnas de una matriz de datos. Específicamente, como se muestra en la Ecuación 3, una rotación circular de las filas o columnas en la información original produce un cambio en la fase de los número complejo que forman la transformada de Fourier, mientras que su magnitud permanece invariante.

Cuando se trabaja con imágenes panorámicas, una rotación de la escena en el plano del suelo produce una rotación circular de sus columnas. Utilizando la información de fase de los componentes de la transformada de Fourier, es posible estimar el desfase angular entre dos imágenes capturadas en un mismo punto.

Nuestro propósito es extender esta propiedad a desplazamientos verticales. Sin embargo, no es posible hacerlo de forma directa. En una rotación en el plano del suelo, la información visual incluida en la escena no varía. Por el contrario, cuando el robot cambia su altura, no sólo se produce un desplazamiento vertical de la información visual, sino que varía el campo visual recogido por la cámara. De esta forma, se introduce nueva información al mismo tiempo que desaparecen filas de la imagen en las partes más bajas o altas de la imagen panorámica, por lo que no es exactamente una rotación circular de las filas de la imagen.

Además, si se produce un cambio en la orientación de la cámara en el plano del suelo al mismo tiempo que se varía su altura, los coeficientes de Fourier se ven afectados por ambos cambios. Este trabajo se centra en la estimación de altura, por lo que partimos de la suposición de que todas las imágenes panorámicas han sido capturadas con la misma orientación.

Para estimar el desfase vertical entre dos escenas capturadas en un mismo punto (x,y), se puede hacer uso de los coeficientes de fase de la transformada de Fourier. En concreto, usamos los valores de una submatriz con los primeros $N_F \times N_F$ elementos de fase, denotada como $ph(F_{N_F \times N_F})$.

Es posible simular el efecto de una rotación vertical en los coeficientes de Fourier. Siendo R la rotación vertical en grados, la submatriz de fases de los coeficientes rotados $ph(F_{N_F \times N_F})_R$ puede ser estimada como:

$$ph(F_{N_F \times N_F})_R = ph(F_{N_F \times N_F}) + R \cdot VRM \qquad (6)$$

siendo VRM la Matriz de Rotación Vertical (*Vertical Rotation Matrix*), que se define como:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$VRM = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 2 & 2 & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_F & N_F & \cdots & N_F \end{pmatrix}_{N_F \times N_F} \quad (7)$$

Dada una imagen de referencia, se realiza la estimación de $ph(F_{N_F \times N_F})_R$ para $R = [-180^\circ, -180^\circ + \Delta R, \ldots, 180^\circ]$. En los experimentos, definimos $\Delta R = 0{,}5^\circ$.

Cuando llega una nueva imagen capturada en el mimo punto (x,y) con altura desconocida, calculamos $ph(F_{N_F \times N_F})$ y comparamos los valores obtenidos con $ph(F_{N_F \times N_F})_R$ de la imagen de referencia.

El valor del coeficiente R para el cual se obtiene la mínima diferencia de los coeficientes de fase entre ambas imágenes denota el desplazamiento vertical entre ambas imágenes, y sirve como indicador topológico de altura.

3.3. ZOOM SOBRE LA VISTA ORTOGRÁFICA

Con esta técnica se propone usar zoom artificial sobre las escenas para medir el desplazamiento vertical del robot móvil. En [1], sus autores presentan un método para estimar la distancia topológica entre imágenes capturadas en una ruta a través del uso de zoom digital.

Sin embargo, no es posible aplicar este método usando directamente la escena omnidireccional, ya se basa en información visual perpendicular al movimiento del desplazamiento. En nuestro caso particular, como se estudia el movimiento en el eje z, haremos uso de la vista ortográfica (o vista de pájaro) de la escena. En [8] y [3] se encuentran trabajos previos que usan la proyección ortográfica de información omnidireccional en tareas de navegación robótica.

Para crear las distintas ampliaciones de la escena, se varía la distancia focal del plano donde se proyecta la vista de pájaro.

Tras obtener las diferentes proyecciones, necesitamos describir la escena. En este trabajo usaremos la Firma de Fourier y la transformada de Fourier 2D para obtener el descriptor de la imagen.

Para estimar la diferencia de alturas entre dos imágenes, utilizamos la distancia focal del plano de proyección. El proceso para llevar a cabo la estimación de la altura, es el siguiente: Primero, obtenemos la vista de pájaro a de la imagen de referencia utilizando diferentes distancias focales, y calculamos su descriptor. Cuando llega una nueva imagen capturada en el mismo punto del plano del suelo a altura desconocida, se obtiene una vista ortográfica de focal fija, y se obtiene su descriptor. Este descriptor se compara con los obtenidos usando las distintas ampliaciones de la imagen de referencia mediante la distancia Euclídea. Tras ello, se selecciona el caso que presenta la mínima distancia (es decir, la asociación que presenta más similitud). La diferencia de focales entre las proyecciones seleccionadas proporciona información de la altura relativa entre ambas escenas.

3.4. SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA DE LA CÁMARA

Tal y como se muestra en [13], dada una imagen, es posible modificar el sistema de coordenadas de referencia de la cámara (CRS o *Camera Reference System*) usando la geometría epipolar, obteniendo de esta forma una nueva proyección de la imagen original que refleja el movimiento simulado del sistema de referencia de la cámara.

Para ello, primero se estiman las coordenadas de los píxeles de la imagen en el mundo real. Consideramos $m = [m_{x_{pix}}, m_{y_{pix}}]$ las coordenadas de los píxeles respecto el centro de la imagen omnidireccional. La calibración de la cámara nos permite obtener la dirección de incidencia de los rayos en la imagen. De esta forma, podemos obtener la proyección sobre la esfera unitaria $M \in \mathbb{R}^3$.

Obtenida esta representación tridimensional de la imagen, aplicamos el cambio del sistema de referencia:

$$M' = M + \rho \cdot T, \quad (8)$$

siendo T el vector desplazamiento unitario en el eje z, ($T = [0,0,1]^T$), y ρ un factor de escala proporcional al desplazamiento del CRS.

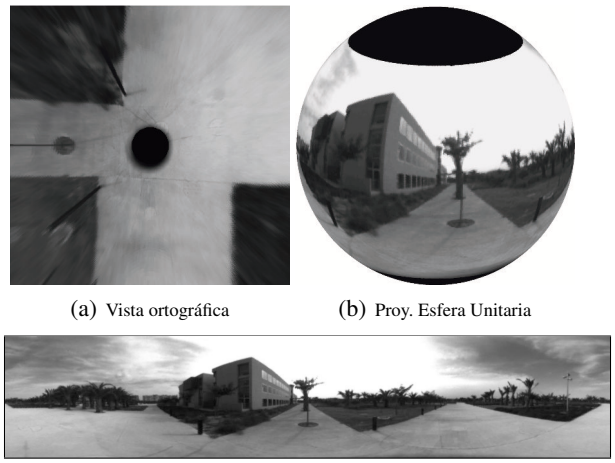
Una vez se han obtenido las nuevas coordenadas de la imagen M', es posible obtener las respectivas coordenadas de los píxeles de la imagen m'. Haciendo la asociación entre los valores de los píxeles de m con las nuevas coordenadas m', obtenemos la nueva imagen omnidireccional incluyendo el desplazamiento del CRS.

Debemos tener en cuenta que, al realizar la asociación de los valores de m y m', algunos de las coordenadas de los píxeles pueden caer fuera del marco de la imagen, y otros podrían carecer de valor de asociación. En este último caso, interpolamos los valores de los píxeles vecinos.

La diferencia de altitud utilizando esta técnica se representa por el factor de escala del desplazamiento unitario ρ.

Cabe destacar que, a partir de M', es posible obtener distintas representaciones de la escena. Específicamente, se obtienen tres representaciones distintas: la vista de pájaro, la imagen panorámica, y la proyección sobre la esfera unitaria. La Figura 2 incluye un ejemplo de cada proyección

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Vista ortográfica (b) Proy. Esfera Unitaria

(c) Vista Panorámica

Figura 2: Distintas proyecciones de una misma imagen.

Tras obtener la nueva representación de la escena, es necesario recoger la información de la escena usando un descriptor. Usamos la Firma de Fourier y la Transformada de Fourier 2D para obtener descriptores de la vista de pájaro y la imagen panorámica, mientras que la transformada de Fourier Esférica es utilizada como técnica de descripción de la proyección sobre la esfera unitaria.

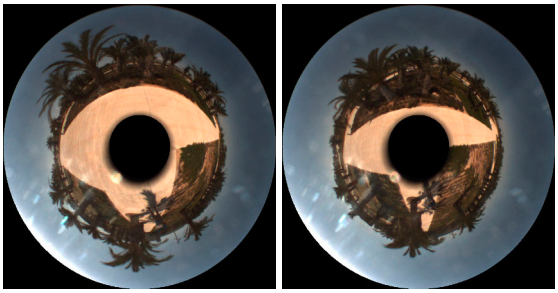
4. BASE DE IMÁGENES

Para poder comprobar el desempeño de las técnicas propuestas de estimación de altura, hemos capturado nuestra propia base de imágenes omnidireccionales en exterior. Para ello se ha hecho uso de un sistema catadióptrico compuesto por un espejo hiperbólico y una cámara con resolución 1280x960 píxeles. Dicha cámara ha sido acoplada a un trípode que permite un rango de altura de 165 cm.

Se han adquirido imágenes en 10 localizaciones distintas. En cada una de estas posiciones se han capturado 12 imágenes a diferentes alturas. La altura mínima es de 125 cm ($h = 1$), mientras que la altura máxima es de 290 cm ($h = 12$), con un paso entre alturas consecutivas de 15cm. La Figura 3 muestra dos ejemplos de imágenes de la base a distintas alturas capturadas en un mismo punto.

Por lo tanto, la base de imágenes está compuesta por 120 imágenes capturadas con condiciones reales de iluminación . No variamos la orientación de las imágenes entre distintas alturas, aunque han sido inevitables pequeñas rotaciones del sistema omnidireccional durante la captura.

La base incluye localizaciones cerca y lejos de edificios, jardines y zona de aparcamientos. También se varía la hora de captura para que las condiciones de iluminación sean distintas.



(a) Altura=125cm($h = 0$) (b) Altura=290cm($h = 12$)

Figura 3: Ejemplo de imágenes capturadas a dos alturas distintas en la misma localización.

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados experimentales de los métodos de estimación de altura relativa presentados en la sección 3. La combinación de los distintos métodos de estimación de altura y descriptores proporcionan 10 posibilidades diferentes. El cuadro 1 muestra un resumen de las distintas representaciones de la información omnidireccional, el descriptor empleado, y la técnica para estimación de la altura.

Se han planteado dos experimentos distintos. En el primero, estimamos la altura de las imágenes tomando como referencia la escena situada en la altura inferior ($h = 1$) de cada localización.

El segundo experimento es análogo al primero, pero cambia la altura de la imagen de referencia. En este caso, corresponde con $h = 5$ (185 cm), disponiendo así de imágenes de test tanto encima como debajo de la escena de referencia.

En la Figura 4 se recogen los resultados de los experimentos, mostrando la media y la desviación típica de todas las alturas para las 10 localizaciones tomando como referencia las escenas situadas a $h = 1$ y $h = 5$.

En las gráficas que recogen los resultados de ambos experimentos podemos comprobar que el valor medio de los distintos estimadores presentan una tendencia monotónica creciente conforme crece la diferencia de altura de las imágenes comparadas, con excepción del Desfase Vertical usando la FFT 2D para diferencias de altura superiores a $h = 8$ (230 cm). Esto nos permite obtener una estimación topológica de la diferencia de altura entre las escenas comparadas.

En general, la desviación estándar crece conforme aumenta la distancia de la imagen de test con la de referencia, mostrando que las técnicas son menos fiables conforme aumenta el rango de alturas. Los métodos basados en la vista ortográfica (independientemente que usen zoom o el cambio del CRS de la cámara), presentan mayor precisión en las alturas más altas al tener una menor desviación en las estimaciones. Por contra, las técnicas que usan la vista panorámica muestran los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 1: Resumen de métodos de estimación de altura junto con las distintas representaciones de la información omnidireccional, el descriptor empleado y el indicador de cambio de altura.

Método Estimación Altura	Representación de la Escena	Descriptor	Param. Desc.	Indicador
Correlación Celda Central Imagen Panorámica	Imagen Panorámica	Firma Fourier	$N_{fila} = 32$	Píxeles (d)
		FFT 2D	$N = 64$	Píxeles (d)
Desfase Vertical FFT2D	Imagen Panorámica	FFT 2D Sig.	$N = 64$	$R(^{o})$
Análisis Multiescala	Vista Ortográfica	Firma Fourier	$N_{fila} = 32$	Δfc
		FFT 2D	$N = 64$	Δfc
Movimiento Sistema Referencia de Cámara	Imagen Panorámica	Firma Fourier	$N_{fila} = 32$	ρ
		FFT 2D	$N = 64$	ρ
	Vista Ortográfica	Firma Fourier	$N_{fila} = 32$	ρ
		FFT 2D	$N = 64$	ρ
	Proyección Esfera Unitaria	SFT	$L_{max} = 64$	ρ

peores resultados.

Considerando los resultados del segundo experimento (mostrados en verde), si la imagen de test está por debajo de la de referencia, todos los indicadores presentan signo negativo. Esto permite determinar la dirección del movimiento vertical. Sin embargo, la técnica que utiliza la fase vertical de la transformada FFT 2D puede presentar resultados negativos aunque la dirección de desplazamiento sea positivo (Fig. 4(c)).

Cuando simulamos el movimiento del sistema de coordenadas de referencia (CRS) de la cámara, descrito en la ecuación Ecuación 8 (sección 3.4), se aplica el mismo desplazamiento a todos los rayos, independientemente de la distancia del objeto respecto de la cámara. Sin embargo, cuando variamos la altura de la cámara en el mundo real, los objetos recogidos por el sensor varían su posición en la imagen dependiendo en su posición relativa con la cámara. Así pues, al variar la altura del sistema catadióptrico, la proyección de los objetos que están lejos de la cámara sufren menos variación en la imagen que aquellos que están más próximos.

Este hecho afecta particularmente a la imagen panorámica y a la proyección sobre la esfera unitaria, ya que tienen un visual amplio que suele recoger objetos situados a distintas distancias del sistema catadióptrico. Por el contrario, la vista de pájaro recoge la información de los ángulos inferiores, que suelen corresponder con el plano del suelo, donde los objetos están situados a una distancia similar. A pesar de ello, el funcionamiento de todos los métodos basados en el desplazamiento del CRS de la cámara es aceptable hasta desfases de altura de 45 cm ($\Delta h = 3$), aunque la vista ortográfica muestra mejores resultados que en el caso de las otras dos proyecciones.

Respecto a los descriptores utilizados, la Firma de Fourier presenta mejores resultados que Fourier 2D, siendo la diferencia especialmente notable en el método basado en la Correlación de la Celda Central (Fig. 4(a) y Fig. 4(b)).

Los resultados experimentales también muestran que la Transformada Esférica de Fourier proporciona un estimador con menor varianza en los resultados que la Firma de Fourier y la FFT 2D utilizando el desplazamiento CRS de la cámara.

La estimación del desfase vertical usando la información de fase de la Transformada de Fourier 2D presenta los peores resultados. En la base de imágenes (sección 4), las imágenes pueden presentar pequeñas rotaciones en el plano del suelo. Estas rotaciones afectan directamente a la fase de los coeficientes de la transformada (Ecuación 3), y por tanto, afecta a la estimación del desfase vertical.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado una comparación de distintas técnicas de estimación de altura relativa aplicable a tareas de navegación de UAVs usando imágenes omnidireccionales. Todas las técnicas utilizan métodos de apariencia global para describir la información visual. Los experimentos incluidos utilizan nuestra propia base de imágenes, capturada en ambientes de exterior reales bajo distintas condiciones de iluminación.

Los resultados experimentales demuestran que todos los métodos propuestos son capaces de proporcionar una estimación de la altura relativa entre dos escenas capturadas en el mismo punto del plano del suelo para pequeños desfases de altura.

Las técnicas que utilizan la vista ortográfica presentan resultados con menor varianza, especialmente los basados en el desplazamiento del CRS de la cámara.

Respecto a los descriptores usados para comprimir la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

información visual, la Firma de Fourier presenta un mejor comportamiento que la Transformada de Fourier 2D. La Transformada de Fourier Esférica es el único descriptor que permite estimar rotaciones en los tres ejes tridimensionales, aunque combinado con el método de estimación de altura basado en el movimiento del CRS de la cámara no permite obtener buena precisión en desplazamientos verticales superiores a 185 cm.

Todos los métodos propuestos lidian con las pequeñas rotaciones en el plano del suelo, excepto el desfase vertical utilizando la FFT 2D, pues es muy sensible a los cambios de fase de los coeficientes de la transformada de Fourier.

Los resultados obtenidos nos animan a continuar esta línea de trabajo, incluyendo el estudio de movimientos de 6 grados de libertad, o la construcción de mapas topológicos que incluyan variación de la altura del robot.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2010-15308 *Exploración Integrada de Entornos Mediante Robots Cooperativos para la Creación de Mapas 3D Visuales y Topológicos que Puedan ser Usados en Navegación con 6 Grados de Libertad*.

Referencias

[1] Amorós, F., Payá, L., Reinoso, Ó., Mayol-Cuevas, W., Calway, A., (2013) "Topological map building and path estimation using global-appearance image descriptors". *ICINCO 2013, Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 385–392

[2] Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L., (2006) "SURF: Speeded up robust features". *Computer Vision at ECCV 2006*. 3951, pp. 404–417

[3] Bonev, B., Cazorla, M., Escolano, F., (2007) "Robot navigation behaviors based on omnidirectional vision and information theory". *Journal of physical agents*. 1, pp. 27–36

[4] Briggs, A.J., Detweiler, C., Mullen, P.C., Scharstein, D., (2004) "Scale-space features in 1D omnidirectional images". *Omnivis 2004, Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras*. pp. 115–126

[5] Chang, C.K., Siagian, C., Itti, L., (2010) "Mobile robot vision navigation and localization using GIST and saliency". *IROS 2010, Int. Conf on Intelligent Robots and Systems*. pp. 4147–4154

[6] Driscoll, J.R., Healy, D.M., (1994) "Computing Fourier transforms and convolyutions on the 2-sphere". *Advances in applied mathematics*. 15, pp. 202–250

[7] Lowe, D.G., (1999) "Object recognition from local scale-invariant features". *ICCV 1999, Int. Conf. on Computer Vision*. 2, pp. 1150–1157

[8] Maohai, L., Han, W., Lining, S., Zesu, C., (2013) "Robust omnidirectional mobile robot topological navigation system using omnidirectional vision". *Engineering applications of artificial intelligence*. 26, pp. 1942–1952

[9] Menegatti, E., Maeda, T., Ishiguro, H., (2004) "Image-based memory for robot navigation using properties of omnidirectional images". *Robotics and Autonomous Systems*. 47, pp. 251–267

[10] Mondragon, I.F., Olivares-Méndez, M.A., Campoy, P., Martínez, C., Mejias, L., (2010) "Unmanned aerial vehicles UAVs attitude, height, motion estimation and control using visual systems". *Autonomous Robots*. 29, pp. 17–34

[11] Paya, L., Fernandez, L., Gil, A., Reinoso, O., (2010) "Map building and Monte Carlo localization using global appearance of omnidirectional images". *Sensors* 10(12), 11468–11497

[12] Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R., (2006) "A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion". *ICVS 2006, Int. Conf. on Computer Vision Systems*. 45 pag.

[13] Valiente, D., Gil, A., Fernández, L., Reinoso, O., (2012) "View-based SLAM using omnidirectinal images". *ICINCO 2012, Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 48–57

[14] Wang, C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y, Wang, C., (2012) "Monocular visual SLAM for smal UAVs in GPS-denied environments". *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. pp. 896–901

[15] Winters, N., Gaspar, J., Lacey, G., Santos-Victor, J., (2000) "Omni-directional vision for robot navigation". *IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, 2000*. pp. 21–28

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

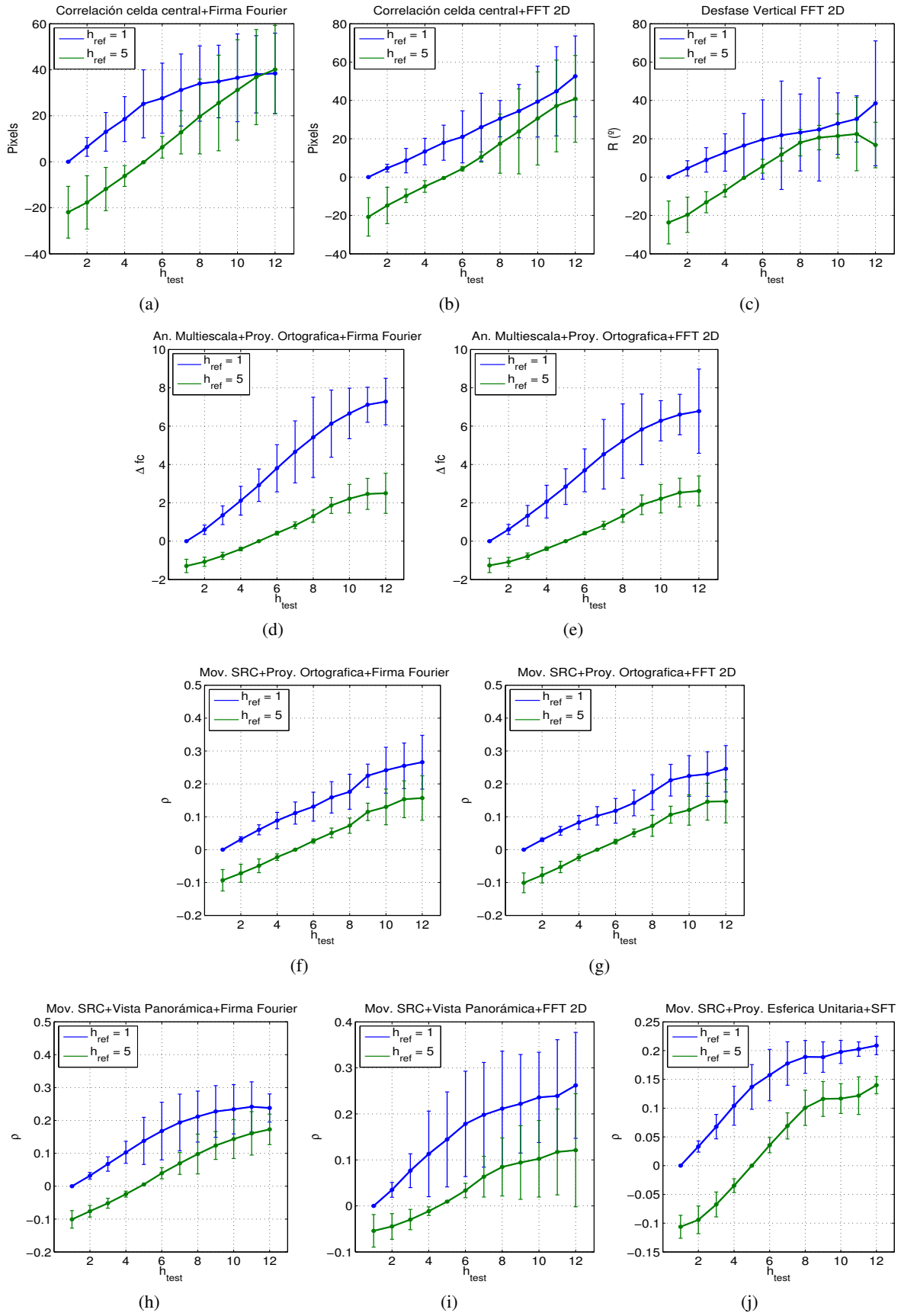


Figura 4: Resultados experimentales estimando la altura respecto a la imagen con altura $h = 1$ y $h = 5$. Media y desviación estándar de todas las localizaciones usando los distintos métodos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SISTEMA DE CONTROL EN RED (SCR) BASADO EN PREDICTOR-OBSERVADOR. ESTUDIO COMPARATIVO CON OTRAS PROPUESTAS DE SCR

A. Cuenca, P. García, P. Albertos
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,
Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial,
Universitat Politècnica de València
{acuenca, pggil, pedro}@isa.upv.es

Resumen

Este trabajo trata de mostrar los beneficios que aporta la consideración de una estructura de control basada en el uso de Predictor-Observador (PO) para un Sistema de Control en Red (SCR) cuando en éste aparecen problemas típicos como retardos variantes en el tiempo, pérdida de paquetes e incluso desorden de paquetes. Para ello se compara con otras propuestas similares de SCR publicadas en revistas de alto impacto.

Palabras Clave: Sistemas de Control en Red, Predictor-Observador, Sistemas Multifrecuencia.

1 INTRODUCCIÓN

En sistemas de control convencional [1] el controlador recibe una señal de entrada uniforme y no retrasada. A partir de esta señal, y teniendo en cuenta fundamentalmente requerimientos de control, el controlador genera una señal de control uniforme. Sin embargo, en SCR o en Redes de Sensores (RS) [2] aparecen ciertos problemas que se deben considerar adicionalmente al diseñar el controlador como, por ejemplo, retardos variantes en el tiempo, pérdida de datos y desorden de paquetes. Estos problemas pueden surgir como consecuencia de la compartición del medio de comunicación entre los diferentes dispositivos del SCR (sensor, controlador, actuador). En este contexto, el controlador recibe una señal no uniforme y retrasada que, si no es tratada, puede degradar la calidad de la señal de control y, por tanto, el rendimiento del sistema. Por todo ello, para diseñar el SCR no solo se ha de afrontar requerimientos de control (caso convencional) sino también los problemas anteriormente enumerados. En esta línea, algunas propuestas de los últimos años giran en torno a enfoques H_∞ [3-7], metodologías fuzzy [8], planificación de ganancia [9, 10], incorporando también predictores adaptativos [11], estrategias multifrecuencia [12], transmisión basada en paquetes incluyendo varias señales de control [13, 14], controladores de realimentación con retraso [15], etc.

Por su parte, en este artículo se plantea un enfoque basado en el uso de PO (previamente presentado en [16]) y, lo que es más novedoso, se compara a otras propuestas similares expuestas en revistas de alto impacto en aras de mostrar los beneficios que aporta a nivel de rendimiento de control e incluso de robustez.

En este trabajo se considera una red con posibilidad de pérdida de datos, por lo que para construir la señal de control se necesita estimaciones de la planta remota. Esto se puede hacer de diferentes maneras [17-22], siendo bastante habitual el uso de filtros de Kalman. El problema de estos filtros es la cantidad de cálculos complejos (matriciales) que incorpora, incrementando la carga computacional del sistema. Sin embargo, la propuesta del SCR basado en PO, haciendo uso de operaciones de cálculo básicas, es capaz de diseñar el controlador considerando un muestreo uniforme (gracias a la inclusión del observador) y de mantener el retardo inducido por la red fuera de la etapa de diseño (gracias al uso de la etapa de predicción).

Cuando el retardo de red variante en el tiempo es mucho más largo que el periodo de muestreo puede surgir el fenómeno del desorden de paquetes. Ello suele implicar cierta degradación de las prestaciones del sistema, ya que para generar la señal de control es probable que se use información no actualizada. Algunos autores le han dado solución desde el control robusto [23] y el predictivo [24]. En la propuesta del SCR basado en PO, gracias a la consideración del observador, se adopta una solución muy sencilla a este problema basada en una simple comparación realizada en la etapa de Selección de Medidas (SM). Así, cuando una medida llega, ésta se toma si es la más nueva de las ya recibidas. De lo contrario se descarta y debe ser observada (dándole un tratamiento similar al de pérdida de dato).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Este trabajo se organiza como sigue: en la sección 2 se resume la propuesta de SCR basada en PO. Después, en las secciones 3, 4 y 5 se compara respectivamente con tres trabajos distintos mostrando que siempre la propuesta basada en PO obtiene beneficios a nivel de respuesta de control e incluso robustez. Finalmente la sección 6 enumera las conclusiones más relevantes del trabajo.

2 PROPUESTA DE SCR BASADA EN PO

2.1 ESCENARIO

Se parte de la configuración de SCR mostrada en la Figura 1, donde aparece el canal de realimentación a través de la red y el controlador colocado junto al actuador. Todos los dispositivos de red son guiados por tiempos. El controlador tiene cuatro etapas: selección de medidas (SM) (para tratar el desorden de paquetes), estimación del estado (para tratar las pérdidas de datos), predicción del estado (para tratar los retardos de red) y generación de la señal de control (en este caso, por realimentación del estado). La planta es modelada según el siguiente sistema discreto lineal

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad (1)$$

$$y_k = Cx_{k-d_k^{sc}}, \quad (2)$$

donde $x_k \in \Re^n$ es el vector de estado, $u_k \in \Re^p$ es la entrada de control, $y_k \in \Re^q$ es la salida. *A*, *B*, *C*, son matrices con dimensiones apropiadas, y $d_k^{sc} \in \aleph$ es el retardo inducido por la red desde sensor a controlador, siendo variante en el tiempo. El retardo de cómputo, de existir, se suma al anterior. *T* se asume como el periodo de muestreo uniforme de tal manera que $t_k = kT$ (donde $k \in \aleph$ y $T>0$).

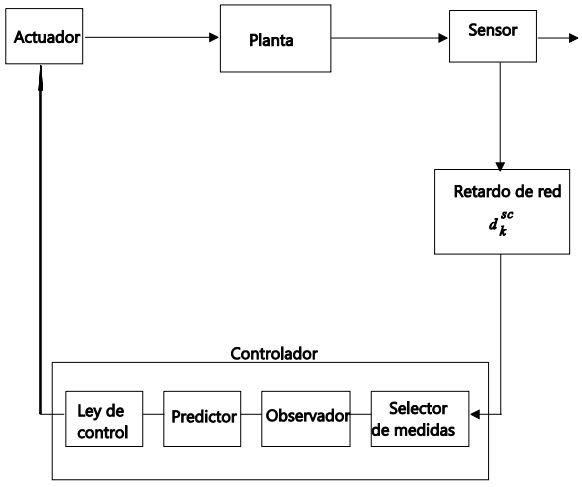


Figura 1: Configuración de SCR.

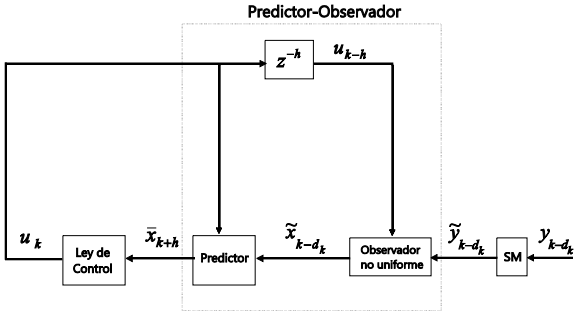


Figura 2: Detalle del controlador.

El valor actual de d_k^{sc} se puede obtener a partir del uso de protocolos de sincronización o técnicas de time-stamping. Conocer este valor es determinante para llevar a cabo las etapas de selección de medidas y estimación. Sin embargo, para la etapa de predicción, puesto que considera *h* pasos adelante en la predicción (siendo $h \in \aleph^+$ un valor invariante en el tiempo), es más interesante conocer cierta información probabilística acerca d_k^{sc} (y no tanto el valor actual) con el fin de poder establecer cotas inferior d_1 y superior d_2 para dicho retardo (esto es, $d_1 \le d_k^{sc} \le d_2$) dentro de las que se defina *h*.

Si no surge confusión, en adelante d_k^{sc} se denotará de manera abreviada como d_k.

A continuación se resume cada una de las partes integrantes del controlador, las cuales quedan detalladas en Figura 2. Para más detalles consúltese [16].

2.2 LEY DE CONTROL POR REALIMENTACIÓN DEL ESTADO

Como se comentó anteriormente, se considerará un controlador por realimentación del estado, siendo su ley de control

$$u_k = -Kx_{k+d_k}, \quad (3)$$

que proporciona el comportamiento requerido para el sistema en bucle cerrado (1)-(3), caracterizado por la matriz del sistema (*A*-*BK*). No obstante, surgen varios problemas cuando se vaya a general esta señal de control:

- Debido al retraso de red, el estado x_{k+d_k} no se conocerá al generar u_k. Por ello, necesitaremos un predictor.
- Debido a la pérdida de paquetes y retrasos variantes en el tiempo, la salida $\tilde{y}_k$ (véase nomenclatura de Figura 2) no estará disponible

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

en cada k instante de muestreo. Por tanto, incluiremos un observador no uniforme.

- Además, como los retardos pueden ser mayores que el periodo de muestreo T, los paquetes pueden quedar desordenados. Este problema se resolverá utilizando un Selector de Medidas (SM) que, gracias al posterior uso del observador, ordenará los paquetes recibidos por el controlador basándose en sencillas comparaciones.

2.3 SELECTOR DE MEDIDAS

Partiendo del uso de información de time-stamping, el modo de funcionamiento de SM queda como sigue:

- El sensor añade una marca de tiempo al paquete enviado, digamos $ts(y_k)$.
- Cuando la medida disponible $\tilde{y}_k$ (nomenclatura a definir en (4)) llega a SM (en el instante k), ésta se tomará por el controlador si es más nueva que la que se tomó anteriormente (en el instante k_{prev}), esto es, $ts(y_k) \equiv ts(\tilde{y}_k) > ts(\tilde{y}_{k\,prev})$.
- De lo contrario, la medida recibida se descarta y se trata como un paquete perdido (se deberá estimar).

2.4 OBSERVADOR NO UNIFORME

Para modelar la pérdida de paquetes en este trabajo se utiliza la siguiente expresión

$$\tilde{y}_k = \theta_k y_k, \tag{4}$$

donde θ_k toma valores {0,1} en función de si se considera (θ_k=1) o no (θ_k=0) la muestra. Como se ha comentado, debido a los retrasos variantes y la pérdida de paquetes, el observador recibe una señal no uniforme (escasa) $\tilde{y}_k$ que ha de reconstruir en otra uniforme (a periodo T). Implementando técnicas de time-stamping, el número de periodos a T entre dos medidas consecutivas disponibles (la previa, tomada en el instante k_{prev}, y la actual, tomada en k) se puede determinar y definir como N_k

$$1 \le N_k \le \bar{N}, \tag{5}$$

donde $\tilde{N} = \bar{N} - 1$ es la cota superior de paquetes no disponibles consecutivos.

A partir de esta cota N_k y de dos señales retrasadas (la de salida no uniforme $\tilde{y}_{k-d_k}$ y la de control u_{k-h}; véase Figura 2), el observador generará una estimación del estado de manera uniforme a periodo T. Para ello se usará la siguiente ley de estimación perteneciente a un observador no uniforme (concretamente, multifrecuencia)

$$\tilde{x}_{k-d_k+1} = A\tilde{x}_{k-d_k} + Bu_{k-h} + \tilde{L}\left(\tilde{y}_{k-d_k} - C\tilde{x}_{k-d_k}\right), \tag{6}$$

donde $\tilde{L}$ es elegido tal que

$$A^{N_k} - \tilde{L}CA^{N_k-1}, \tag{7}$$

es Schur. Nota que $\tilde{L}$ será nulo si no hay medida de la salida.

2.5 ETAPA DE PREDICCIÓN: CONDICIÓN DE ESTABILIDAD DEPENDIENTE DEL RETRASO VARIANTE EN EL TIEMPO

Considerando el modelo del proceso (1)-(2), la ley de control de realimentación del estado queda

$$u_k = -K\bar{x}_{k+h}, \tag{8}$$

donde $K \in \Re^{m\times n}$ y $\bar{x}_{k+h}$ es la siguiente ley de predicción del estado con h pasos hacia delante

$$\bar{x}_{k+h} = A^h\tilde{x}_{k-d_k} + A^{h-1}Bu_{k-h} + \cdots + Bu_{k-1}, \tag{9}$$

siendo $\tilde{x}_{k-d_k}$ la estimación del estado retrasado y u_{k-i} (i=1,…,h) las acciones de control pasadas.

Tratando $\Delta h = |h - d_k|$ como una incertidumbre del retraso, se puede proponer una condición de estabilidad suficiente para asegurar un máximo Δh. Así, partiendo de (1)-(2), (8)-(9), el estado del sistema en bucle cerrado queda

$$x_{k+1} = (A-BK)x_k - BKA^h\tilde{x}_{k-d_k} + BKA^h x_{k-h}, \tag{10}$$

entonces, (10) es asintóticamente estable para cualquier $d_1 \le d_k \le d_2$, si existe matrices definidas positivas P, Q_1, Q_2, Z_1 y Z_2, y matrices X_1, X_2, Y_1 y Y_2, tal que la siguiente LMI es factible

$$\begin{pmatrix} \Gamma & -Y_1 & -Y_2 & M^{\mathrm{T}}P & d_2(M-I)^{\mathrm{T}}Z_1 & h(M-I)^{\mathrm{T}}Z_2 \\ * & -Q_1 & 0 & A_1^{\mathrm{T}}P & d_2A_1^{\mathrm{T}}Z_1 & hA_1^{\mathrm{T}}Z_2 \\ * & * & -Q_2 & -A_1^{\mathrm{T}}P & -d_2A_1^{\mathrm{T}}Z_1 & -hA_1^{\mathrm{T}}Z_2 \\ * & * & * & -P & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -d_2Z_1 & 0 \\ * & * & * & * & * & -hZ_2 \end{pmatrix} < 0,$$
$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 \\ Y_1^{\mathrm{T}} & Z_1 \end{pmatrix} \ge 0, \quad \begin{pmatrix} X_2 & Y_2 \\ Y_2^{\mathrm{T}} & Z_2 \end{pmatrix} \ge 0, \tag{11}$$

donde $M := (A - BK)$, $A_1 := BKA^h$ y $\Gamma := -P + d_2X_1 + hX_2 + Y_1 + Y_1^{\mathrm{T}} + Y_2 + Y_2^{\mathrm{T}} + (d_2 - d_1 + 1)Q_1 + Q_2$. Como es conocido en las expresiones LMI, '*' representa un término inducido por simetría. El superíndice 'T' denota matriz transpuesta.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN PLANIFICADOR DE GANANCIA

Esta comparativa se hace para el trabajo presentado en [10] donde se propone un enfoque de planificación de ganancia para afrontar los retardos variantes en el tiempo inducidos por la red. En este trabajo el controlador es un PID multifrecuencia y no se contempla pérdida de datos.

Haciendo uso del ejemplo expuesto en [10] donde en una de las simulaciones se utiliza una multiplicidad (relación de periodos de medida y control) N=2, un periodo de control T=0.625s (por lo que el periodo de medida es NT=1.25s) y un retardo fijo d_k=1.24s (es decir, casi NT; este enfoque no permite retardos mayores de NT), se compara con el enfoque de SCR basado en PO descrito en la sección 2 considerando el mismo retardo. Los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5, observándose que en el caso del SCR basado en PO aparece una clara reducción del tiempo de establecimiento (de aprox. el 70%), aunque a costa de un mínimo aumento de la sobreoscilación (de aprox. el 2%). Todo ello teniendo en cuenta una señal de control que, aunque es un poco más enérgica en las primeras iteraciones, luego tiende a ser muy similar.

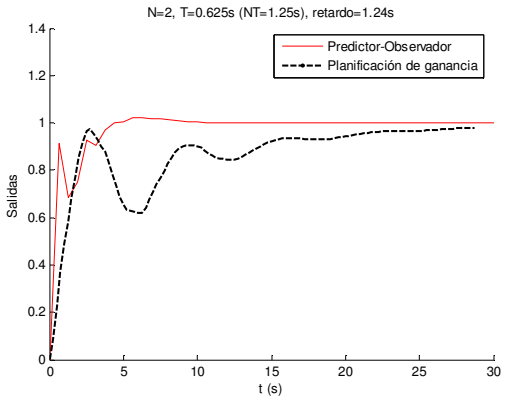


Figura 4: Salidas comparativa rendimiento.

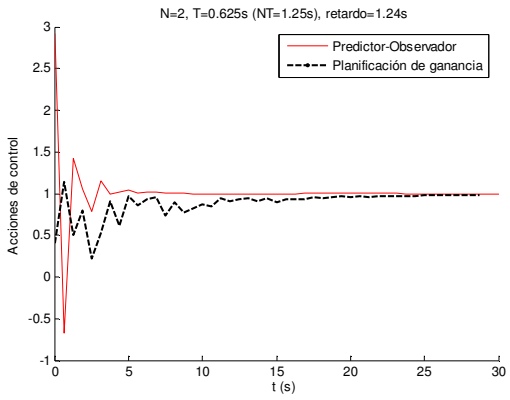


Figura 5: Acc. de control comparativa rendimiento.

Por otro lado, para ver la robustez de las propuestas a nivel de simulación, se varía exageradamente la ganancia del proceso real. Así, siendo el proceso real G_p(s), el modelo del mismo queda como G_m(s):

$$G_p(s) = \frac{7}{(s+1)(s+4)};\ G_m(s) = \frac{4}{(s+1)(s+4)} \qquad (12)$$

Las salidas y acciones de control se representan en las Figuras 6 y 7, observándose que la propuesta de [10] es menos robusta que la basada en PO, ya que la salida de la primera se hace inestable mientras que la de la segunda es capaz de seguir la referencia escalón unitario, aunque experimenta un aumento importante de la sobreoscilación (pasa del 2% al 60%) y del tiempo de establecimiento (pasa de 10s a 15s) con respecto a lo obtenido en la salida de la Figura 4.

A parte de la comparativa expuesta, este enfoque basado en PO supone ciertas mejoras con respecto al presentado en [10] ya que permite la consideración de cualquier tipo de retraso (en concreto, mayores a NT) y de patrones irregulares de medida (por pérdida de datos).

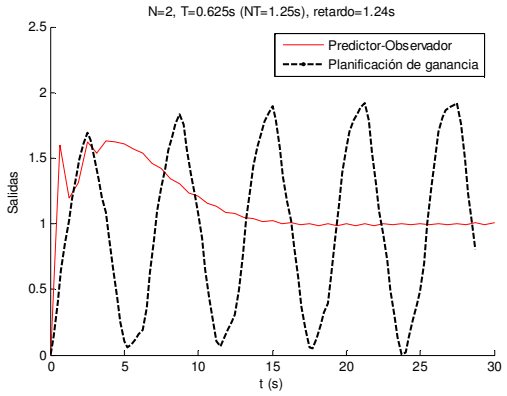


Figura 6: Salidas comparativa robustez.

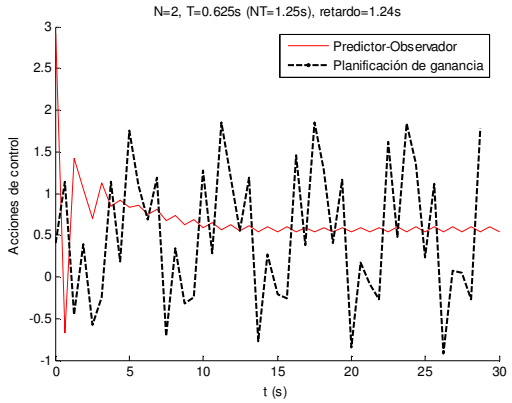


Figura 7: Acciones de control comparativa robustez.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN CONTROLADOR ESTABILIZANTE ANTE PÉRDIDAS ACOTADAS

En esta sección se compara la propuesta de SCR basada en PO con la expuesta en [25] donde se propone un controlador de realimentación del estado diseñado para ser estable ante pérdida acotada de paquetes y retardos fijos en el SCR. Por tanto, podemos compararlo con la propuesta de SCR basado en PO ya que ésta incluye retardos que pueden incluso ser variantes.

La comparación se hará a partir de un ejemplo que aparece en [25] y permitirá mostrar que la propuesta basada en PO obtiene mejor rendimiento de control (partiendo de una señal de control de magnitud similar) cuando se considera retardos fijos inducidos por la red (pudiendo ser iguales o mayores al periodo de muestreo) y pérdida arbitraria pero acotada de paquetes. Además, se mostrará la versatilidad del diseño basado en PO ya que se verá cómo éste es robusto ante eventuales cambios en el retardo de red. Sin embargo en [25], si el retardo cambia, se necesita rediseñar la K del controlador de realimentación.

El ejemplo considera el siguiente sistema continuo:

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix}-1 & 0 & -0.5\\ 1 & -0.5 & 0\\ 0 & 0 & 0.5\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}u(t) \qquad (13)$$

Se escoge un periodo de muestreo T=0.5s y una cota máxima de pérdidas $\overline{N}=2$ (usaremos la nomenclatura de nuestro trabajo). El retardo de red será constante y unitario (d_k=1). La propuesta de [25] obtiene para este caso esta ley de control de realimentación del estado:

$$u=[-0.0109-0.0074-0.7176]x \qquad (14)$$

Para nuestra propuesta, situando los polos continuos en s=[-1.1 -1.0 -0.9], elegimos la siguiente ganancia de realimentación:

$$K=[-0.2549\ \ -0.1274\ \ \ 1.465] \qquad (15)$$

y, situando los polos discretos en z=[0.501 0.502 0.503], elegimos la siguiente ganancia del observador monofrecuencia (que es similar al descrito en (6) pero considerando muestreo uniforme)

$$L=[0.6888\ \ \ 0.4745\ \ -2.0958] \qquad (16)$$

La ganancia del observador no uniforme $\tilde{L}$ se obtendrá en función de la multiplicidad N_k (número de pérdidas entre dos muestras efectivas) tras ubicar los polos en $z^{N_k}=\left[0.501^{N_k}\ \ 0.502^{N_k}\ \ 0.503^{N_k}\right]$.

La simulación del sistema de control en lazo cerrado para ambas propuestas se muestra en la Figura 8, donde los círculos en el eje temporal marcan las muestras que no se pierden. Se observa claramente una mayor rapidez en alcanzar el permanente para la propuesta de SCR basada en PO (tiempo de establecimiento de hasta un 50% menor). La Figura 9 muestra que la mejora en el rendimiento del sistema se logra pese a generar unas acciones de control de magnitud similar a las de la propuesta de [25], si bien son un poco más enérgicas en la primeras iteraciones. Obsérvese en esta figura la ventaja de incluir un PO en el SCR, ya que la señal de control dispone de un valor no nulo ya desde el primer instante de tiempo.

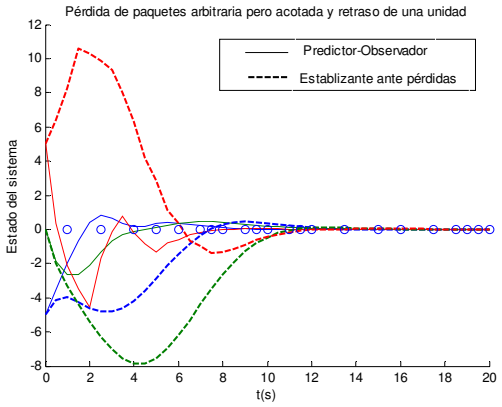


Figura 8: Estado comparativa rendimiento.

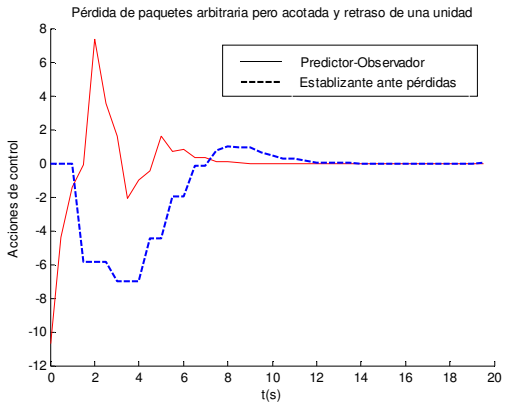


Figura 9: Acc. de control comparativa rendimiento.

Por último, si por algún motivo el SCR incrementara eventualmente el retardo, pasando por ejemplo a ser de dos unidades del periodo de muestreo (d_k=2), la propuesta basada en PO permite mantener la estabilidad del sistema, mientras que la propuesta de [25] hace que la salida se haga inestable (ver Figura 10). Esto se debe a que la propuesta de [25] necesita recalcular una nueva ley de control teniendo en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cuenta este nuevo valor del retardo, lo que la hace menos versátil y robusta frente a la nuestra.

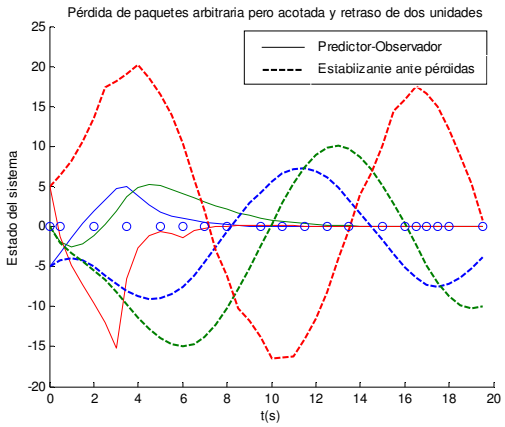


Figura 10: Estado comparativa robustez.

5 COMPARACIÓN CON SCR BASADO EN PAQUETES

La última comparativa es con un trabajo presentado en [14] en el que se diseña un controlador con una gama de subcontroladores a utilizar de manera conmutada en función del retardo existente en el SCR. Estos subcontroladores se diseñan teniendo en cuenta las pérdidas aleatorias pero acotadas y el máximo retardo que se producirá en el SCR, y se envían en un único paquete hacia el actuador.

En la comparativa se mostrará que nuestra propuesta basada en PO permite mejorar sensiblemente el rendimiento de control cuando se considera retardos variantes (pudiendo ser iguales o mayores al periodo de muestreo) y pérdida arbitraria pero acotada de paquetes. Es necesario hacer hincapié en que uno de los aspectos que destaca el trabajo desarrollado en [14] es que se trata de una propuesta basada en paquetes (es decir, se aprovecha cada envío del controlador hacia el actuador para pasar un vector de acciones de control a partir de las que posteriormente realizar la conmutación adecuada) y que eso mejora las propuestas publicadas anteriormente por otros autores (por ejemplo, se cita el trabajo de [25]) en las que no se implementa esa estrategia de control, si no que se usa controladores fijos ante cualquier condición de red. Pues bien, nuestra propuesta basada en PO considera también un esquema fijo y, sin embargo, puede llegar a obtener prestaciones ligeramente mejores que las logradas en [14].

El ejemplo a utilizar es el mismo que en la sección anterior pero ahora T=0.1s, $\overline{N}=3$ (máximo 3 pérdidas consecutivas), d_k=6 (retardo máximo de red es 0.6s). Es interesante hacer notar que con esta selección de retrasos y periodo de muestreo se puede dar el efecto del desorden de paquetes. Por tanto, se necesita previamente de una ordenación de las muestras para descartar las que llegan desordenadas al controlador (aspecto recogido en nuestra propuesta). Por tanto, aquí para definir el patrón de muestras perdidas lo que realmente se hace es llevar a cabo esta ordenación y luego ver que efectivamente nunca hay más de 3 paquetes perdidos consecutivos. Esto ha sucedido en la gran mayoría de las simulaciones realizadas dados los parámetros del ejemplo. Las simulaciones que no lo cumplían se han desechado.

En [14] el retardo total inducido por la red se mide sumando las pérdidas acumuladas y esto hace considerar hasta 6 niveles de retardo (de 0s a 0.9s, en tramos de 0.15s). Así, las K diseñadas son:

$$\begin{aligned} K(0)&=[-0.0046\ 0.0171\ -1.7087]; \\ K(1)&=[-0.0833\ -0.0320\ -1.4323]; \\ K(2)&=[0.1689\ 0.0245\ -1.3254]; \\ K(3)&=[0.0054\ 0.0020\ -1.0724]; \\ K(4)&=[-0.0003\ -0.0001\ -1.0098]; \\ K(5)&=[-0.0002\ -0.0001\ -1.0127]; \end{aligned} \quad (17)$$

Para nuestra propuesta, tras situar los polos continuos en s=[-0.91 -0.89 -0.88], elegimos la siguiente ganancia de realimentación fija

$$K = [-0.222\ \ -0.108\ \ \ 1.591] \quad (18)$$

y, tras situar los polos discretos en z=[0.89 0.895 0.9], elegimos la siguiente ganancia del observador monofrecuencia (que es similar al descrito en (6) pero considerando muestreo uniforme)

$$L = [0.13\ \ 0.092\ -0.39] \quad (19)$$

La ganancia del observador no uniforme $\tilde{L}$ se obtendrá en función de la multiplicidad N_k (número de pérdidas entre dos muestras efectivas) tras ubicar los polos en $z^{N_k}=\left[0.89^{N_k}\ 0.895^{N_k}\ 0.9^{N_k}\right]$.

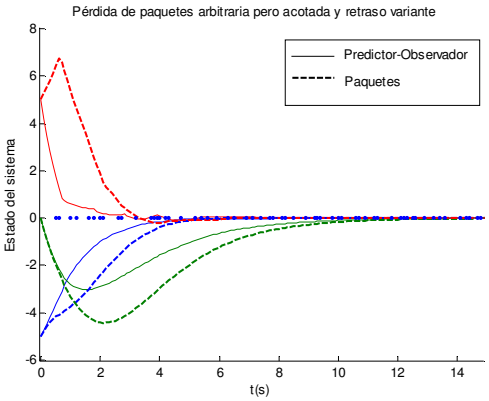


Figura 11: Estado comparativa rendimiento.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

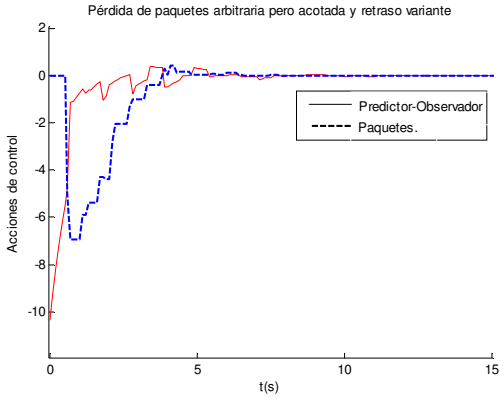


Figura 12: Acc. de control comparativa rendimiento.

La Figura 11 muestra la simulación del sistema de control en lazo cerrado. Como en la sección anterior, los círculos en el eje temporal son las muestras que no se pierden. En esta simulación se observa una ligera mejora (de hasta un 20% de reducción del tiempo de establecimiento) para la propuesta basada en PO frente a la de [14], pese a utilizar un controlador fijo y unas acciones de control de magnitud similar (ver Figura 12). Nuevamente, la primera acción de control muestra un valor mayor, el cual, gracias al uso de PO, es no nulo.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un enfoque de SCR basado en PO en el que se da solución a tres problemas típicos de los SCR, como son retardos variantes en el tiempo, pérdida de datos y desorden de paquetes. Las ventajas fundamentales de este enfoque son su sencillez de implementación y su bajo coste computacional. Además, mediante tres estudios comparativos, se observa los beneficios de la propuesta a nivel de mejora en el rendimiento de control e incluso mayor robustez.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto DPI2011-28507-C02-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

Referencias

[1] K. Ogata, *Discrete-time control systems*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1987.

[2] Y. Tipsuwan and M. Chow, "Control methodologies in networked control systems," *Control Eng. Practice*, vol. 11, no. 10, pp. 1099–1111, 2003.

[3] T. Jia, Y. Niu, and X.Wang, "*H*∞ control for networked systems with data packet dropout," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 198–203, 2010.

[4] Y. Wang and G. Yang, "Robust *H*∞ model reference tracking control for networked control systems with communication constraints," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 7, no. 6, pp. 992–1000, 2009.

[5] H. Gao and T. Chen, "Network-based H∞ output tracking control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 655–667, 2008.

[6] H. Karimi, "Robust *H*∞ filter design for uncertain linear systems over network with network-induced delays and output quantization," *Modeling, Identification and Control*, vol. 30, no. 1, pp. 27–37, 2009.

[7] ——, "Delay-range-dependent linear matrix inequality approach to quantized *H*∞ control of linear systems with network-induced delays and norm-bounded uncertainties," *Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Part I: J. of Syst. and Control Eng.*, vol. 224, no. 6, pp. 689–700, 2010.

[8] K. Lee, S. Lee, and M. Lee, "Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 784–792, 2003.

[9] Y. Tipsuwan and M-Y. Chow, "Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation- Part I: Networked Control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1218-1227, December 2004.

[10] A. Sala, A. Cuenca, and J. Salt, "A retunable PID multi-rate controller for a networked control system," *Inform. Sci.*, vol. 179, no. 14, pp. 2390–2402, June 2009.

[11] A. Cuenca, J. Salt, V. Casanova, and R. Pizá, "An approach based on an adaptive multi-rate Smith predictor and gain scheduling for a networked control system: implementation over Profibus-DP," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 473–481, April 2010.

[12] A. Cuenca, J. Salt, A. Sala, and R. Pizá, "A delay-dependent dual-rate PID controller over an Ethernet network," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 7, no. 1, pp. 18–29, Feb. 2011.

[13] Y. Tian and D. Levy, "Compensation for control packet dropout in networked control systems," *Inform. Sci.*, vol. 178, no. 5, pp. 1263–1278, 2008.

[14] Y. Zhao, G. Liu, and D. Rees, "Modeling and stabilization of continuous-time packet-based networked control systems." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B*, vol. 39, no. 6, pp. 1646–1652, Dec. 2009.

[15] X. Zhao, S. Fei, and C. Sun, "Impulsive controller design for singular networked control systems with packet dropouts," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 7, no. 6, pp. 1020–1025, 2009.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[16] A. Cuenca, P. García, P. Albertos, and J. Salt, "A Non-Uniform Predictor-Observer for a Networked Control System", *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 9, no. 6, pp. 1194–1202, 2011.

[17] H. Gao and T. Chen, "$H\infty$ estimation for uncertain systems with limited communication capacity," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 11, pp. 2070–2084, 2007.

[18] S. Oh, L. Schenato, P. Chen, and S. Sastry, "Tracking and coordination ofmultiple agents using sensor networks: System design, algorithms and experiments," *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 234–254, 2007.

[19] M. Moayedi, Y. Foo, and Y. Soh, "Optimal and suboptimal minimum-variance filtering in networked systems with mixed uncertainties of random sensor delays, packet dropouts and missing measurements," *Int. J. Control, Autom., and Syst.*, vol. 8, no. 6, pp. 1179–1188, 2010.

[20] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, "Stability of networked control systems," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 84–99, 2001.

[21] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, 2007.

[22] J. Baillieul and P. Antsaklis, "Control and communication challenges in networked real-time systems," *Proc. of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 9–28, 2007.

[23] J. Li, Q. Zhang, Y. Wang, and M. Cai, "$H\infty$ control of networked control systems with packet disordering," *IET Control Theory Appl.*, vol. 3, no. 11, pp. 1463–1475, March 2009.

[24] Y. Zhao, G. Liu, and D. Rees, "Improved predictive control approach to networked control systems," *IET Control Theory Appl.*, vol. 2, no. 8, pp. 675–681, Aug. 2008.

[25] J. Xiong, J. Lam, "Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss", *Automatica* 43 (2007) 80 – 87.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL DE LA TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA DE UN FILTRO ACTIVO DE TIPO PARALELO

José Carlos Alfonso-Gil, C. Ariño, C. Bernad Viciano, H. Beltrán, E. Pérez
jalfonso@uji.es, arino@uji.es, carlos.bernad@uji.es, hbeltran@uji.es, pereze@uji.es

Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Universitat Jaume I, Av. VicentSosBaynat, s/n 12071 Castellón de la Plana, España.

Resumen

En este artículo se proponen dos estructuras de control para mantener constante la tensión del bus de continua partido de un filtro activo. La primera de ellas utiliza un regulador de tipo proporcional mientras que la segunda propone la utilización de un regulador de tipo PI seguido de un filtro paso bajo. Para analizar el comportamiento de cada uno de los bucles de control se ha desarrollado un modelo del filtro activo mediante el softwareMatlab/Simulink®. Los resultados de simulación muestran que ambas estructuras permiten controlar de forma adecuada la tensión del bus de continua. Sin embargo, el regulador de tipo PI con filtro paso bajo consigue que las corrientes importadas desde la red, para mantener constante la tensión del bus de continua, presenten un menor contenido armónico que las importadas cuando se utiliza un regulador de tipo P.

Palabras Clave: Calidad eléctrica, Filtro activo, Bus de continua dividido.

1 INTRODUCCIÓN.

Los filtros activos o Shunt Active Power Filters (SAPF), se desarrollan para mejorar la eficiencia en los sistemas eléctricos, reduciendo los efectos de las cargas no lineales conectadas a dichos sistemas[1]–[5]. En baja tensión los más utilizados son los de tipo paralelo [1], [6], [7], los cuales se conectan en paralelo con la carga, en el punto de conexión común (pcc), tal y como se muestra en la Figura 1. Un filtro activo es equivalente a una fuente de corriente controlable que genera las corrientes de compensación para que, desde la red eléctrica, el sistema formado por el filtro activo y la carga solamente demande corrientes eficientes.

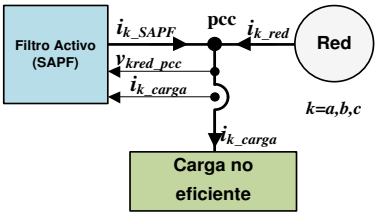


Figura 1: Diagrama de bloques de un filtro activo conectado a la red

El funcionamiento de los filtros activos está basado en diferentes teorías de la potencia eléctrica [8], [9] a partir de las cuales se identifican cada una de las potencias no eficientes (provocadas por el desfase, el desequilibrio y la distorsión armónica) y se calculan las corrientes de referencia para realizar la compensación de dichas potencias. Según el IEEE Std.1459 [8] la única potencia que un sistema eficiente debería demandar de la red eléctrica es la potencia activa fundamental y de secuencia positiva (P_1^+). Para ello, el filtro, a partir de las corrientes de carga y las tensiones de red ymediante el IEEE Std.1459, identifica las potencias no eficientes que demanda la carga y considerando dichas potencias genera las corrientes de compensación necesarias para que el conjunto formado por el filtro y la carga demande de la red solamente P_1^+. Para el seguimiento de las corrientes de referencia se han utilizado diferentes tipos de reguladores. Entre ellos están los reguladores en banda de histéresis[10]–[12],los reguladores de tipo P con prealimentación[13], [14] y los de tipo PI trabajando en marco de referencia síncrono [15], [16].

Por otro lado, para el funcionamiento del filtro activo resulta necesario mantener constante la tensión del bus de continua. Para ello, en [17] a partir del error obtenido entre la tensión del bus y la tensión de referencia se suma a las corrientes de compensación una corriente proporcional al error. Otros autores en [2] y [18]sustituyen el regulador P por un regulador PI. Así mismo, en [18]se calculan las pérdidas de potencia en el SAPF y mediante un filtro paso alto se suman a la salida del PI actuando como una prealimentación. En otros trabajos [19], se utiliza el control Fuzzy con un regulador banda de histéresis para mantener constante la tensión del bus.

La utilización de un regulador proporcional presenta el inconveniente de que las corrientes importadas desde la red experimentarán las mismas oscilaciones que la tensión del bus y, por lo tanto, no serán sinusoidales ni estarán en fase con las tensiones de red. Por otro lado, aunque el regulador PI filtra las variaciones rápidas de la tensión del bus, no consigue que las corrientes importadas de la red contengan solamente componente fundamental y de secuencia positiva (I_1^+) y con ello un factor de potencia unitario a la salida del SAPF.

Otro aspecto a considerar en el control de la tensión del bus es el diseño de los elementos pasivos del SAPF. Así, el valor de la capacidad y tensión del bus de continua interviene directamente en la capacidad

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de compensación del SAPF mientras que el valor de la inductancia limita el rizado de corriente a la salida del SAPFy la generación de armónicos, entre otros aspectos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este artículo se propone la utilización de un regulador PI junto con un filtro pasobajo (PB) de primer orden para el control de la tensión del bus de continua del SAPF. Con ello se pretende que las corrientes importadas desde la red contengan solamente I_1^+ y, a la vez, obtener un factor de potencia unitario a la salida del SAPF, consiguiendo de esta forma que desde la red el conjunto formado por el SAPF y las cargas demanden solamente P_1^+ y se comporten como una carga eficiente, tal y como recoge el IEEE Std.1459. Así mismo se realiza el diseño de la capacidad y la tensión del bus de continua así como la inductancia de salida del SAPF.

El artículo está organizado de la siguiente forma: inicialmente en el apartado 2 se selecciona la tensión del bus de continua y se realiza el diseño de los elementos pasivos. En el apartado 3 se diseña un regulador de tipo P y un regulador de tipo PI junto con un filtro paso bajo para el control de la tensión del bus de continua. Finalmente, en el apartado 4 se muestran los resultados de simulación en donde se comparan las prestaciones de ambas estrategias de control.

2 FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DEL FILTRO ACTIVO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SAPF

Tal y como se ha comentado,un filtro activo se comporta como una fuente controlable de corriente que genera las corrientes de compensación necesarias para que desde la red solamente sean importadas corrientes eficientes.En la Figura 2se muestra el diagrama de bloques de un SAPF con bus de continua dividido.

El bus de continua permite intercambiar los flujos de energía con las cargas de modo que desde la red eléctrica solamente se demande P_1^+. Para ello, mediante un convertidor trifásico de tres ramas se generan a la salida del SAPF unas corrientes que compensen las ineficiencias de la carga. La utilización de un bus de continua dividido permite, en este tipo de topologías de SAPF, disponer de un punto para conectar el neutro de la carga y así poder compensar los desequilibrios que pueda presentar dicha carga. Las inductancias de salida del convertidor permiten conectar dos fuentes de tensión (dicho convertidor y la red) a la vez que sirven de filtro para minimizar los armónicos de alta frecuencia debidos a las conmutaciones de los transistores de la etapa de potencia.

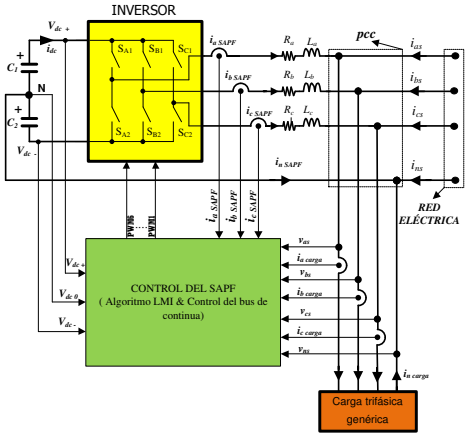


Figura 2:Diagrama de bloques del SAPF

Para una mejor comprensión, en la Figura10 se puede observar el comportamiento del SAPF durante la compensación del desfase, el desequilibrio y la distorsión armónica.Así, se puede ver cómo tras la conexión del SAPF a los 0.02s las corrientes que demanda de la red el conjunto formado por el SAPF y la carga ya no presentan dichos fenómenos no eficientes. Así mismo, en la Figura11 se pueden ver las corrientes que genera el SAPF a su salida para realizar la citada compensación.

2.2 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS PASIVOS DEL SAPF

Los elementos pasivos del SAPF son el condensador del bus de continua y la inductancia de salida. Las funciones del condensador decontinua $\boldsymbol{C_{Vdc}}$, son: mantener la tensión del bus de continua ($\boldsymbol{V_{dc}}$) con el mínimo rizado posible en régimen estacionario, servir como elemento de almacenamiento de energía para suministrar la potencia reactiva y la potencia armónica durante la compensación y,finalmente, proveer la diferencia de potencia activa entre la carga y la red durante los transitorios [20]. Considerando estos objetivos, resulta necesario seleccionar una capacidad del condensador del bus que permita al SAPF compensar la diferencia de potencia activa entre la carga y la red durante un determinado transitorio de tiempo (habitualmente unos ms) y, a su vez, mantener el rizado de la tensión del bus dentro de unos márgenes.

Para poder determinar la capacidad del condensador del bus de continua, primero resulta necesario calcular la tensión de trabajo del mismo. Para ello, en función de la topología del SAPF desarrollado se han propuesto diferentes métodos que permiten calcular la relación entre la tensión de la red ($\mathbf{V_{RED}}$) y la $\mathbf{V_{dc}}$. En [21] se propone que la tensión mínima del bus de continua sea igual a $\mathbf{2\sqrt{2}\,V_{SAPF}}$. Por otro lado, en [12] se propone que dicha tensión sea superior a$\sqrt{\mathbf{3}}\,\mathbf{V_{SAPFmax}}$ y en [20] que sea superior a $\sqrt{\mathbf{3}}\,\mathbf{V_{REDmax}}$. En este trabajo se ha seleccionado un valor de la tensión del busde continua como el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

propuesto en [18]en donde$\mathbf{V_{dc}} > \sqrt{\mathbf{2}}\,\mathbf{V_{RED}}$. Teniendo en cuenta que $\mathbf{V_{RED}} = \mathbf{400\ V}$ se tiene que $\mathbf{V_{dc}} > \mathbf{565.68}\,\boldsymbol{V}$. Además de esto, para el cálculo de la tensión del bus de continua, hay que tener presente que un valor elevado de $\mathbf{V_{dc}}$ permitirá una buena ganancia del regulador de corriente pero puede incrementar el valor del $\mathbf{THD_{Vpcc}}$[22]. Teniendo en cuenta todo esto, se ha seleccionado un valor de la tensión del bus de continua de$\mathbf{V_{DC}} = \mathbf{800\ V}$.

Una vez seleccionada la tensión del bus, ya se puede realizar el cálculo de la capacidad del condensador del bus de continua. Para ello en este artículo se ha utilizado la ecuación (1) propuesta en [20].

$$C_{CC} = \frac{2SnT}{V_{dc\,max}^2 - V_{dc\,min}^2} \tag{1}$$

Donde S es la potencia aparente del SAPF ($4.15\ kVA$), n es el número de ciclos para transferir la energía del bus de continua (se ha seleccionado $n = 2$), T es el periodo de red ($20\ ms$)y $V_{dc\,max}$, $V_{dc\,min}$ son los valores de tensión máximo y mínimo que se desea en el bus de continua (se ha considerado una variación de V_{dc} de $\pm 10\ \%$). A partir delos valores definidos para cada uno de los términos de la ecuación (1) se ha obtenido una capacidad del condensador del bus de continua de $C_{Vdc} = 1.3\ mF$. Teniendo en cuenta que en este trabajo se ha seleccionado un SAPF con bus partido como el mostrado en la Figura 2se obtienen unos valores de $C_1 = C_2 = 2.6\ mF$.

Una vez se han obtenido los valores de la tensión y la capacidad del condensador del bus de continua, a continuación se selecciona la inductancia de salida del SAPF. Para ello se ha utilizado la ecuación (2) propuesta en [17] y [23].

$$L_{min} = \frac{m_a V_{dc}}{2\sqrt{2}\Delta I_{sw,p-p} K_L f_{sw}} \tag{2}$$

Donde L_{min} es el valor de la mínima inductancia necesaria para limitar el rizado máximo ($I_{sw,p-p}$) de la corriente de salida del SAPF a un determinado valor.V_{dc}es la tensión del bus de continua, m_a es el índice de modulación de amplitud, K_L es el factor de sobrecarga y f_{sw} es la frecuencia de conmutación. A partir de los valores de V_{dc} y de f_{sw} mostrados en la Tabla 1, considerando un rizado en corriente de$I_{sw,p-p} = 2\ A$, un valor de $m_a = 1$ y un factor de sobrecarga de $K_L = 1.5$ se ha obtenido un valor de $L_{min} = 5.98\ mH$, tomando$L_{min} = 6\ mH$ para llevar a cabo las simulaciones. Con este valor de inductancia se consigue limitar el rizado de corriente a la salida del SAPF y por otro lado se está limitando la pendiente máxima de las corrientes de compensación que se pueden generar a la salida del SAPF a un valor determinado por la ecuación (3).

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{DC1} - \sqrt{2}\,V_{RED}}{L} \tag{3}$$

Donde V_{DC1} es la tensión de la mitad del bus de continua, V_{RED} es la tensión de fase de la red y L es la inductancia del filtro de salida del SAPF. Sustituyendo los valoresde cada uno de estos parámetros, se obtiene un valor de la pendiente máxima de la corriente de salida del SAPF de 12455,15 A/s. Este valor asegura que el SAPF podrá compensar todas aquellas cargas cuyas corrientes de compensación presenten una pendiente igual o inferior a dicho valor.

Tabla 1 Valores de los parámetros del SAPF

PARÁMETRO	VALOR
Tensión del bus de continua	800 V ±10%
Tensión de línea en la red	400V
Potencia del SAPF	4.15KVA
Corriente nominal	6 A
Capacidad del bus de continua	1.3 mF
Inductancia del filtro de salida	6 mH
Resistencia del filtro de salida	400 mΩ
Frecuencia de red	50±1Hz
Frecuencia de la señal PWM	15750 Hz

3 CONTROL DE TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA.

Tal y como se ha comentado, para un correcto funcionamiento del SAPFresulta imprescindible mantener estable la tensión del bus de continua. Para elloes necesario disponer de un control que permita importar desde la red una corrientepara compensar las pérdidas de potencia delSAPF [24]. Estas pérdidas son las que se producen en los condensadores del bus de continua, en la conmutación de los transistores y en la inductancia de salida del SAPF.

Otro aspecto a considerar es que, durante el funcionamiento del SAPF con bus partido,las tensiones de las partes alta y baja del bus tienden a desequilibrarse [25]. Por tanto es, necesario disponer de un lazo de regulación que permita controlar dicho desequilibrio. Para llevar a cabo ambos controles (tensión total del bus y de la mitad del bus) se proponen en este artículo dos estructuras de control. La primera de ellas se muestra en la Figura 3. En dicha figura se puede ver el diagrama de bloques del esquema de regulación utilizado. Así mismo, se puede ver que en esta estructura se utilizan dos reguladores tipo P para llevar a cabo la regulación de ambas tensiones.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

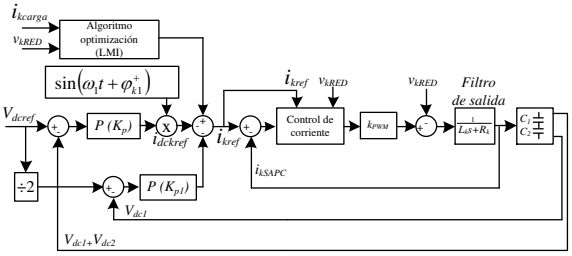


Figura 3:Esquema de control de la tensión del bus de continua con regulador de tipo P

En esta estructura de control, a partir del error entre la tensión de referencia del bus de continua y la tensión medida se generan unas corrientes de referencia proporcionales a dicho error (i_{dckref}). Estas corrientes se suman a las corrientes de referencia calculadas por el algoritmo de optimización basado en desigualdades matriciales lineales (LMIs)para formar las corrientes de referencia del SAPF (i_{kref}),las cuales deben ser generadas a su salida para llevar a cabo la compensación del desequilibrio, el desfase y la distorsión armónica de la carga [14].El segundo bucle de control mostrado en la Figura 3 es el encargado de controlar el desequilibrio del bus de continua. Para ello, a partir del error entre la mitad de la tensión de referencia del bus de continua y la tensión medida en la parte alta de dicho bus genera una corriente continua que se suma a las anteriores. Esta corriente provoca un desplazamiento (offset) de las corrientes de compensación que permite controlar el desequilibrio en dicho bus.

Para diseñar los reguladores de tensión se han utilizado las ecuaciones (4)y (5), propuestas en [26]. Para calcular el valor de la K_p del regulador de tensión del bus de continua se establece una relación entre los flujos de energía que hay entre la carga y el SAPF y las pérdidas de potencia que dichos flujos provocan en el SAPF. A partir de dicha relación se obtiene la ecuación (4).

$$K_p = \frac{2 \cdot C \cdot V_{dc}}{3 \cdot V_1^+ \cdot n \cdot T_{red}} \tag{4}$$

Donde C es la capacidad del bus de continua, V_{DC} es la tensión de dicho bus, V_1^+ es la componente fundamental y de secuencia positiva de la tensión de red, n es el número de ciclos necesarios para trasferir la energía del bus (para el diseño del regulador se ha tomado $n = 1$) y T_{red} es el periodo de la red.Así mismo,para el diseño del regulador encargado de controlar el desequilibrio en el bus de continuase ha utilizado la ecuación (5).

$$K_{P1} = \frac{C_1}{T_{equilibrado}} \tag{5}$$

Donde $C_1 = C_2 = C/2$ es la capacidad de la mitad del bus de continua y$T_{equilibrado}$es el tiempo establecido para conseguir equilibrar la tensión de bus. Para obtener la ecuación(5), se parte de la idea de que para compensar los desequilibrios del bus, es necesario importar desde la red una corriente que provoque la carga de un condensador y descargue al otro, manteniendo la suma de las dos partes del bus igual a V_{DC}[26].Sustituyendo los valores definidos para cada uno de los parámetros mostrados en las ecuaciones(4) y (5)se han obtenido unos valores de $K_p = 0.15$ y $K_{p1} = 0.13$.

Tal y como se ha comentado en la introducción, el inconveniente que presenta este tipo de control es que la corriente de referencia que se genera no es sinusoidal, esto provoca que las corrientes importadas desde la red para mantener la tensión del bus constante tampoco lo sean. Para evitar esto y conseguir que las corrientes importadas de la red solamente contengan I_1^+ se propone una estructura de control como la mostrada en la Figura 4.

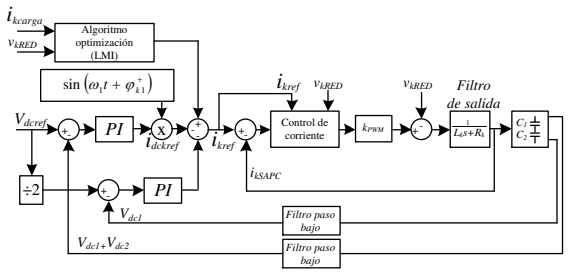


Figura 4: Esquema de control de la tensión del bus de continua con regulador PI y filtro paso bajo

La configuración propuesta utiliza unos filtros paso bajo con una constante de tiempo de 20mspara eliminar las variaciones rápidas de la tensión del bus de continuay sustituye los reguladores de tipo P por unos de tipo PI para eliminar el error de posición en régimen estacionario.Para el diseño de los reguladores PI se ha utilizado el método del lugar de las raíces, mediante el cual se han obtenido los valores de K_P y K_I de los dos reguladores ajustando un tiempo de establecimiento mínimo. De esta forma, se ha obtenido una $K_P = 0.0667$ y una $K_I = 1.8864$para el PI utilizado para controlar la tensión del bus completo, yuna $K_P = 0.0046$ y una $K_I = 0.0146$ para el PI encargado del control del desequilibrio del bus de continua.

4 SIMULACIÓN DEL SAPF

Para analizar el funcionamiento del control del bus de continuase ha desarrollado un modelo del sistema mediante el software Matlab/Simulink® y la toolboxSimPowerSys como el mostrado en la Figura 5. El sistema está formado por un bus de continua dividido y un convertidor trifásico con tres impedancias a la salida (Z1, Z2 y Z3), cuyos valores son$400\ m\Omega$ para la parte resistiva y de $6\ m$Hpara la parte inductiva en cada fase.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

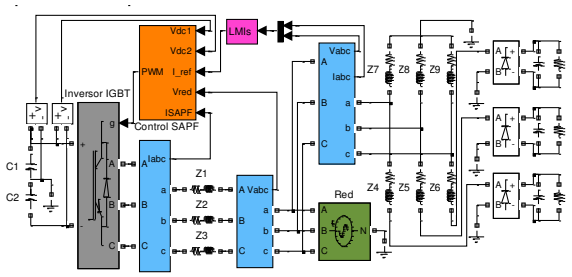


Figura 5: Diagrama Simulink del SAPF

Para generar ciertas ineficiencias que haya que compensar se ha utilizado una carga lineal y otra no lineal. La carga lineal la componen las impedancias Z7, Z8, Z9 y la no lineal está formada por tres rectificadores monofásicos iguales donde cada uno de ellos tiene un condensador y una resistencia a su salida (Cr, Rr), y un filtro a la entrada formado por las impedancias Z4, Z5 y Z6, respectivamente.Los valores de unas y otras se muestran en laTabla 2.

Tabla 2 Valores de la carga

PARTE LINEAL (Z_7, Z_8, Z_9)			*PARTE NO LINEAL*		
Z_7	Z_8	Z_9	*3 x Rectificador + Filtro (Z_4, Z_5, Z_6) (C_r=1000μF, R_r=50Ω)*		
R_7=30Ω L_7= 30mH	R_8=40Ω L_8=40mH	R_9=50Ω L_9=60mH	R_4=1Ω L_4=5mH	R_5=1 Ω L_5= 5mH	R_6=1 Ω L_6= 5mH

Para la generación de las corrientes de referencia encargadas de la compensación de las ineficiencias se ha utilizado una S-Function (bloque LMIs) en la cual se ha programado el algoritmo de optimización. En el bloque "control SAPF", se han programado los reguladores utilizados para el seguimiento de la corriente de salida del SAPF y los encargados del control de la tensión del bus de continua.Para analizar el funcionamiento de los controles propuestos se han llevado a cabo una serie de simulaciones en las cuales se ha comparado la respuesta del regulador P y la del regulador PI con filtro PB ante una variación en las corrientes de compensación provocada por una variación en lascorrientes carga.

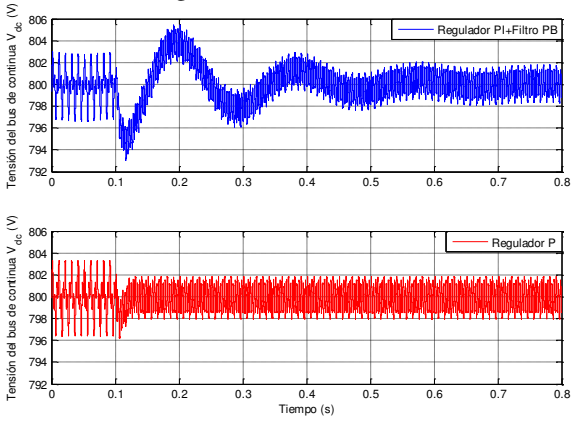


Figura 6: Tensión del bus de continua ante una variación en las corrientes de carga

Para ello, una vez superado el transitorio inicial de arranque del sistema, se introduce a los 0.1 segundos un cambio en los valores de la carga. Este cambio provoca una modificación en las corrientes de referencia (salida del algoritmo de optimización) y, a su vez, una modificación de las corrientes de salida del SAPF para compensar las nuevas potencias no eficientes. En la parte superior de laFigura 6 se muestrala tensión del bus de continua controlada mediante el regulador PI con filtro PB y en la parte inferior se puede observar la tensión del bus pero, en este caso, controlada con un regulador de tipo P. En dicha figura se puede ver cómo el regulador PI con el filtro PB consigue que la tensión del bus alcance el régimen estacionario a los 0.6 segundos, mientras que con el regulador de tipo P el tiempo es de 0.03 segundos. Se puede observar también en dicha figura que en ambos casos el rizado de la tensión del bus de continua disminuye después del transitorio de carga. Esto se debe a que la carga final presenta un valor de desfase y desequilibrio inferior al inicial lo que se traduce en una menor corriente de compensación generada por el SAPF y, como consecuencia, un menor rizado de la tensión del bus de continua.A su vez, en la Figura 7 se puede ver la tensión de la mitad del bus de continua. Se observa cómo ambos reguladores consiguen controlar el desequilibrio de dicha tensión, presentando el regulador PI un tiempo de respuesta mayor, tal y como sucede con el control de la tensión del bus completo.

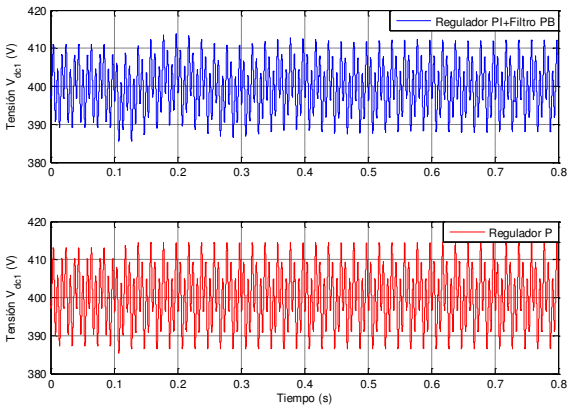


Figura 7: Tensión de la mitad del bus de continua (V_{DC1}) ante una variación en las corrientes de carga

Si se analiza ahora la corriente de referencia que genera cada uno de los controles (i_{dckref}) se puede ver en la Figura 8cómo en el caso del regulador PI la corriente es sinusoidal mientras que para el caso del regulador P la corriente presenta un gran contenido armónico.

Esto se debe a que el filtro paso bajo elimina las variaciones que presenta la tensión del bus de continua durante su funcionamiento y, así, el regulador PI genera una corriente a su salida constante. A su vez, la salida del regulador PI se multiplica por una sinusoide que solamente tiene

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

componente fundamental de secuencia positiva y en fase con las tensiones de red, consiguiendo de esta forma que el SAPF demande de la red una corriente que solamente contenga componente fundamental y de secuencia positiva y en fase con las tensiones de red (I_1^+). De esta forma se consigue mantener constante la tensión del bus de continua sin introducir armónicos de corriente a la red eléctrica.

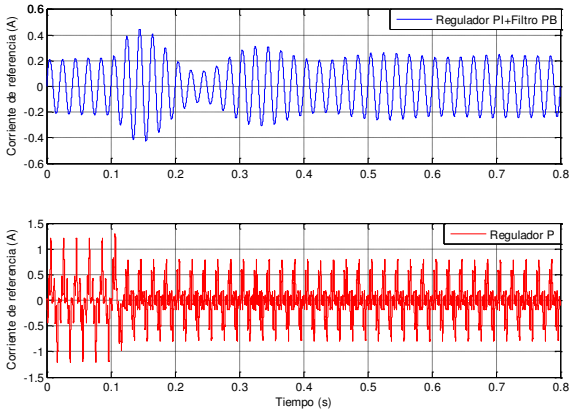


Figura 8: Corriente de referencia de la fase "a"(i_{dcaref}) para el control de la tensión del bus de continua.

En el caso del regulador proporcional, al no disponer de filtro PB, las oscilaciones de la tensión del bus de continua se convierten en variaciones de corriente a la salida del regulador. A su vez, la corriente de salida del regulador P, al igual queparael caso del regulador PI, se multiplica por una sinusoide de componente fundamental de secuencia positiva y en fase con las tensiones de red. En este caso la corriente de referencia que se genera con este tipo de control contienen un elevado número de armónicos tal y como se puede ver en la parte inferior de la Figura 8. Así mismo, las corrientes que genera el SAPF a su salida también presentarán un elevado contenido armónico.

Para analizar el efecto sobre las corrientes de red tras la compensación de las ineficiencias de la carga con los dos tipos de control analizados, estas se muestran en la Figura 9. En dicha figura se observa cómo en el caso del regulador PI con filtro PB, una vez realizada la compensación, las corrientes demandadas de la red tienen una forma sinusoidal con un contenido armónico del 4.81%. En cambio, con el regulador de tipo proporcional el contenido armónico de dichas corrientes es del 6.03%.

Una vez analizado el control del bus de continua se han realizado una serie de simulaciones para obsevar el funcionamiento del SAPF durante la compensación del desequilibrio, el desfase y la distorsión armónica.

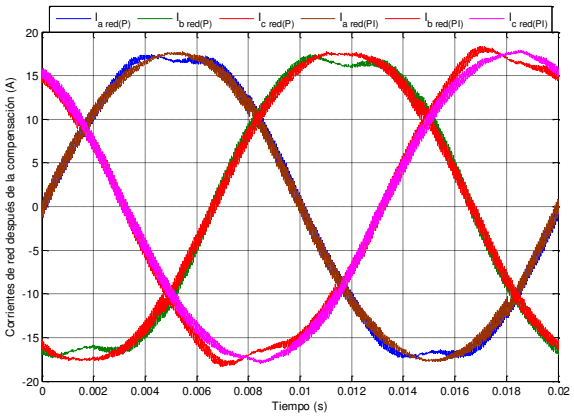


Figura 9:Corrientes de red tras la compensación con regulador PI con filtro PB y regulador P

En la Figura10 se pueden ver las corrientes de red antes y después de la conexión del SAPF. Se observa cómo antes de la conexión del SAPF las corrientes de red (que son las demandadas por la carga) presentan los fenómenos de desequilibrio, desfase y distorsión armónica (THD=35.98%). Tras la conexión del SAPF a los 0.02 s se puede ver cómo éste compensa el desfase y el desequilibrio a la vez que, tal y como se ha visto anteriormente, reduce el THD hasta un 4.81% de las corrientes de red.

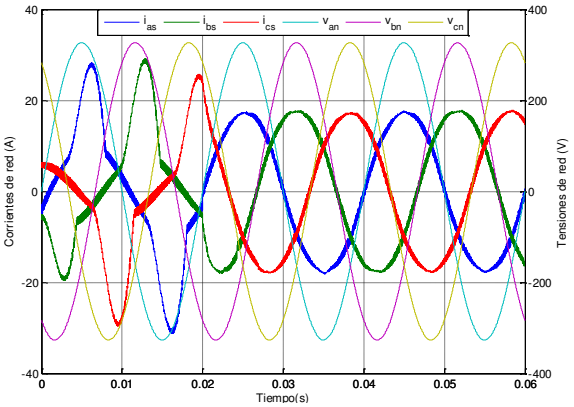


Figura10 Corrientes de red durante el transitorio de compensación

Así mismo, en la Figura11 se muestran las corrientes que genera el SAPF para llevar a cabo la compensación de las ineficiencias. Dichas corrientes contienen los fenómenos del desfase, el desequilibrio, y la distorsión armónica necesaria para compensar los fenómenos no eficientes de la carga.

Finalmente, se puede concluir que el regulador de tipo P permite controlar la tensión del bus de continua, sin embargo las corrientes generadas por el SAPF para mantener dicha tensión presentan un cierto contenido armónico. En cambio, la utilización de un regulador PI con un filtro PB permite controlar la tensión del bus de continua y, a la vez, consigue que las corrientes que genera el SAPF para mantener la tensión del bus presenten un contenido armónico inferior a las obtenidas con el regulador de tipo P.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

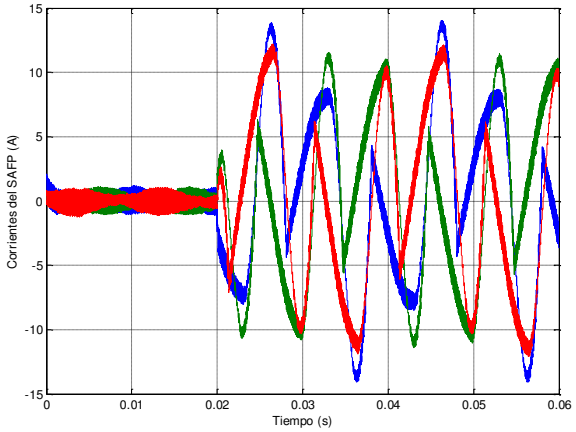


Figura11 Corrientes del SAPF durante el transitorio de compensación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el proyecto "Desarrollo de un sistema de gestión energética integral para microrredes inteligentes (SmartGrids)" (P1·1B2013-34), financiado por la Universitat Jaume I de Castellón.

Referencias

[1] S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, A. Abellan-Garcia, S. Segui-Chilet, and J. C. Alfonso-Gil, "Improved Shunt Active Power Compensator for IEEE Standard 1459 Compliance," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2692–2701, Oct. 2010.

[2] S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, S. Segui-Chilet, A. Abellan-Garcia, M. Alcaniz-Fillol, and R. Masot-Peris, "Selective Compensation in Four-Wire Electric Systems Based on a New Equivalent Conductance Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 8, pp. 2862–2874, Aug. 2009.

[3] M. Angulo, D. A. Ruiz-Caballero, J. Lago, M. L. Heldwein, and S. A. Mussa, "Active Power Filter Control Strategy With Implicit Closed-Loop Current Control and Resonant Controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2721–2730, Jul. 2013.

[4] H. Zhou, Y. W. Li, N. R. Zargari, Z. Cheng, R. Ni, and Y. Zhang, "Selective Harmonic Compensation (SHC) PWM for Grid-Interfacing High-Power Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1118–1127, Mar. 2014.

[5] P. Acuna, L. Moran, M. Rivera, J. Dixon, and J. Rodriguez, "Improved Active Power Filter Performance for Renewable Power Generation Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 687–694, Feb. 2014.

[6] A. Bhattacharya and C. Chakraborty, "A Shunt Active Power Filter With Enhanced Performance Using ANN-Based Predictive and Adaptive Controllers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 421–428, Feb. 2011.

[7] S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, S. Segui-Chilet, A. Abellan-Garcia, M. Alcaniz, and R. Masot-Peris, "Selective Shunt Active Power Compensator Applied in Four-Wire Electrical Systems Based on IEEE Std. 1459," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2563–2574, Oct. 2008.

[8] "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," *IEEE Std 1459-2010 (Revision IEEE Std 1459-2000)*, pp. 1–52, 2010.

[9] M. A. Mulla, R. Chudamani, and A. Chowdhury, "Generalized instantaneous power theory and its applications to shunt active power line conditioners under balanced and unbalanced load conditions," in *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012, pp. 413–418.

[10] B. Singh and V. Verma, "Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 792–799, Apr. 2008.

[11] B. Singh, V. Verma, and J. Solanki, "Neural Network-Based Selective Compensation of Current Quality Problems in Distribution System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 53–60, Feb. 2007.

[12] F. Liu and A. I. Maswood, "A Novel Variable Hysteresis Band Current Control of Three-Phase Three-Level Unity PF Rectifier With Constant Switching Frequency," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 1727–1734, Nov. 2006.

[13] J. C. Alfonso-Gil, C. Ariño, H. Beltrán, and E. Pérez, "Comparative Study of Current Controllers for Shunt Active Power Compensators used in Smart Grid Applications," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*. 978-84-695-6965-8, Bilbao (Spain), 2013.

[14] J. C. Alfonso-Gil, E. Pérez, C. Ariño, and H. Beltrán, "Optimization Algorithm for Selective Compensation in a Shunt Active Power Filter,"

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

IEEE Trans. Ind. Electron., vol. En revisión, no. --, p. –.

[15] M. Kesler and E. Ozdemir, "Synchronous-Reference-Frame-Based Control Method for UPQC Under Unbalanced and Distorted Load Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 3967–3975, Sep. 2011.

[16] F. Briz, P. Garcia, M. W. Degner, D. Diaz-Reigosa, and J. M. Guerrero, "Dynamic Behavior of Current Controllers for Selective Harmonic Compensation in Three-Phase Active Power Filters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1411–1420, May 2013.

[17] R. D. Patidar and S. P. Singh, "Digital Signal Processor Based Shunt Active Filter Controller for Customer-generated Harmonics and Reactive Power Compensation," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 38, no. 8, pp. 937–959, May 2010.

[18] M. C. Shah, S. K. Chauhan, P. N. Tekwani, and R. R. Tiwari, "Analysis, design and digital implementation of a shunt active power filter with different schemes of reference current generation," *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 3, pp. 627–639, Mar. 2014.

[19] A. El Khateb, N. A. Rahim, J. Selvaraj, and M. N. Uddin, "Fuzzy Logic Controller Based SEPIC Converter for Maximum Power Point Tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2014.

[20] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, "Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters," *Power Electron. IET*, vol. 7, no. 2, pp. 418–430, Feb. 2014.

[21] G. K. Singh, A. K. Singh, and R. Mitra, "A simple fuzzy logic based robust active power filter for harmonics minimization under random load variation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 8, pp. 1101–1111, Jun. 2007.

[22] S. Ponnaluri and A. Brickwedde, "Generalized system design of active filters," in *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230)*, 2001, vol. 3, pp. 1414–1419.

[23] N. Gupta, S. P. Singh, and S. P. Dubey, "Fuzzy logic controlled shunt active power filter for reactive power compensation and harmonic elimination," in *2011 2nd International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCT-2011)*, 2011, pp. 82–87.

[24] S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, S. Segui-Chilet, A. Abellan-Garcia, M. Alcaniz-Fillol, and R. Masot-Peris, "Selective Compensation in Four-Wire Electric Systems Based on a New Equivalent Conductance Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 8, pp. 2862–2874, Aug. 2009.

[25] M. K. Mishra, A. Ghosh, A. Joshi, and H. M. Suryawanshi, "A Novel Method of Load Compensation Under Unbalanced and Distorted Voltages," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 288–295, Jan. 2007.

[26] S. Orts Grau, "Sistema de compensación mediante filtro activo de potencia con sistema de obtención de las corrientes de referencia selectivo utilizando control 3D-3B SVPWM de la etapa de potencia. Aplicación a sistemas industriales a 4 hilos." Universitat Politècnica de València, 30-Nov-2008.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CLASIFICACION DE RESPUESTAS DE PULSOS DE UN ADS POR ANÁLISIS DISCRIMINANTE

J. L. Fernández Marrón
E.T.S.I. de Informática, UNED, C/Juan del Rosal 16, 28040 Madrid,
jlmarron@dia.uned.es

Juan Blázquez Martínez, José Miguel Barcala Riveira
CIEMAT, Avda. Complutense, 22, Madrid-28040,
juan.blazquez@ciemat.es, miguel.barcala@ciemat.es

Resumen

Una reducción de la cantidad de residuos a almacenar redunda en el coste del almacenamiento y en la radio-toxicidad del mismo. La reducción mediante los incineradores de residuos, llamados ADS (Accelerator Driven Systems, Sistema conducido por Acelerador) se encuentra en la actualidad en fase de diseño. Constan de tres ingredientes básicos: reactor, acelerador y blanco de espalación. Parte del combustible del reactor es residuo nuclear, por lo que se espera que opere en condiciones subcríticas con una multiplicación próxima a 20 y con un espectro rápido de neutrones.

En el trabajo utiliza la técnica de análisis discriminante SMV (Support Vector Machine, Máquina de Soporte Vectorial). Para ello se ha puesto a punto la programación de una SMV con el objetivo de discriminar los pulsos en términos de aceptabilidad a fin de ser capaz en tiempo real (milisegundos) comprobar el correcto funcionamiento del ADS desde el punto de vista del pulso de neutrones que origina la reacción.

Palabras Clave: SMV, Maquinas de soporte vectorial, ADS, Validación de datos adquiridos.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de la eliminación de residuos nucleares es un tema que suscita grandes discusiones y es una de las causas de rechazo a la utilización de la energía nuclear. Una cifra sencilla, 0.2 Tm ^{239}Pu/(GWe año) permite cuantificar el problema de los residuos nucleares en España, donde la potencia nuclear instalada es de 7.74 GWe. Es estas condiciones, y al cabo de 40 años de funcionamiento esperado de una Planta, se habrán generado 62 Tm de ^{239}Pu. También se generarán isótopos del neptunio y de los actínidos menores en cantidades muy inferiores, del orden del 5% del correspondiente al plutonio para cada tipo de residuo. Dado que las cantidades son pequeñas, se ha dispuesto confinarlas en un alojamiento con las condiciones geológicas adecuadas.

La solución para el problema de los residuos depende en cada país de sus condiciones geológicas, la cantidad de residuos y la densidad demográfica. Una reducción de la cantidad de residuos a almacenar redunda en el coste del almacenamiento y en la radio-toxicidad del mismo. La reducción mediante los incineradores de residuos, llamados ADS (Accelerator Driven Systems) se encuentra en la actualidad en fase de diseño. Constan de tres ingredientes básicos: reactor, acelerador y blanco de espalación. Parte del combustible del reactor es residuo nuclear, por lo que se espera que opere en condiciones subcríticas con una multiplicación próxima a 20 y con un espectro rápido de neutrones. El acelerador es un ciclotrón o semejante, que acelera protones hasta 1 GeV; y el blanco de espalación, un pequeño cilindro de un material con elevado número atómico, normalmente plomo-bismuto, que generará los neutrones a utilizar.

Los residuos se producen en un PWR típico con un flujo del orden de 3. 10^{13} neutrones/(cm^2 s) por lo que el ADS ha de ser un medio con un flujo cinco veces superior al menos, lo que requiere una corriente de protones de 12.5 mA. Cuando los protones dejan su energía en el blanco de plomo expulsan neutrones (neutrones de espalación). Estos neutrones actúan como una fuente de intensidad próxima a 6. 10^{15} neutrones/s. Los ADS se encuentran en la actualidad en estado de experimentación y diseño. La Comunidad Económica Europea ha aprobado la construcción del MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) en Mol (Bélgica), un reactor subcrítico acoplado a un acelerador de protones que creará los neutrones de espalación necesarios para su funcionamiento. El objetivo de este ADS será experimentar en condiciones reales la incineración de residuos nucleares.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Además de muy intensa, la fuente de espalación tiene una naturaleza de pulso, por lo que interesan otras dos magnitudes: la duración del pulso y su frecuencia. Una ventaja añadida de la naturaleza pulsante de la fuente es que puede medirse la reactividad -y por tanto la multiplicación subcrítica- con la respuesta al pulso. Téngase en cuenta que el quemado en los ADS es al menos cinco veces más intenso que en un PWR, por lo que las derivas de reactividad hacen necesaria su monitorización 'en línea'.

Sin embargo el pulso de neutrones de una fuente de espalación no es ideal; tiene una duración y una forma aproximadamente gaussiana. En Blázquez [1] se resuelven analíticamente las ecuaciones cinéticas en las condiciones de trabajo de un ADS, y los resultados se ajustan a pulsos experimentales provenientes del proyecto MUSE con el acelerador GENEPI simulando una fuente de espalación. Los parámetros de la fuente que se obtienen de este ajuste reproducen el pulso con suficiente exactitud. Este ajuste depende de cinco parámetros fácilmente y rápidamente calculables. Lo que permitirán la caracterización de los pulsos en el tiempo que existe entre dos pulsos (del orden de milisegundo). Por eso el objetivo del trabajo será aprovechar este intervalo entre pulsos para determinar el estado del acelerador y su posible corrección en caso de mal funcionamiento

2 PULSOS EN EL EXPERIMENTO MUSE

MUSE [2] es un conjunto de experimentos destinados a simular la neutrónica en un ADS de potencia cero con un amplio margen de subcriticidades (k_{eff}: 0.90÷0.99). En particular en MUSE 4, el reactor es el MASURCA (Cadarache, CEA) con un volumen de 6000 litros de núcleo, enriquecido al 25% con Pu con un contenido próximo al 18% de ^{240}Pu. El reflector radial y axial es acero inoxidable/sodio. Se trata pues de un conjunto muy rápido en el que la vida media de los neutrones instantáneos se estima en Λ= 2.31 μs y con una fracción de neutrones retardados β=360 pcm.

La fuente de neutrones, GENEPI, es pulsada, con pulsos de duración del orden de 1 μs, y una frecuencia máxima de 5kHz. GENEPI acelera deuterio para generar las reacciones D(d,n)^{3}He y D(t,n)^{4}He. La intensidad de la fuente de neutrones depende de la deposición del material elegido para el blanco; en caso de deuterio, 4. 10^4 neutrones/pulso, y en caso de tritio, 1.7 10^6 neutrones/pulso. Ambas

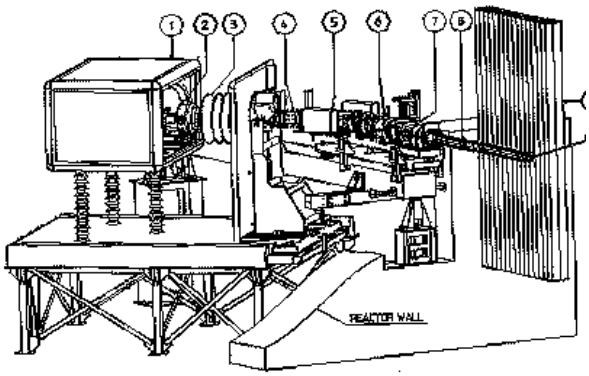


Fig. 1 Esquema de acelerador GENEPI

intensidades son aun muy lejanas a las consideradas para la incineración de actínidos, pero permiten examinar la neutrónica de ADS de potencia cero, sin realimentaciones de reactividad debidas a la temperatura.

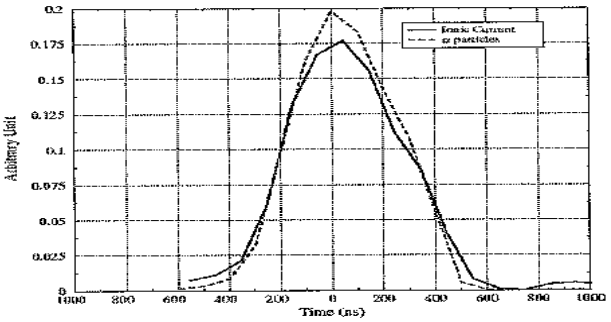


Fig. 2 Perfil gaussiano GENEPI

El perfil temporal de la fuente neutrónica se obtiene a través de la medida de la corriente iónica del acelerador y también con el ritmo de detección de partículas alfa. Obsérvese que el perfil temporal es asimilable a una gaussiana con una desviación típica del orden de 0.3 μs. La anchura total del pulso puede tomarse en principio como 1 μs.

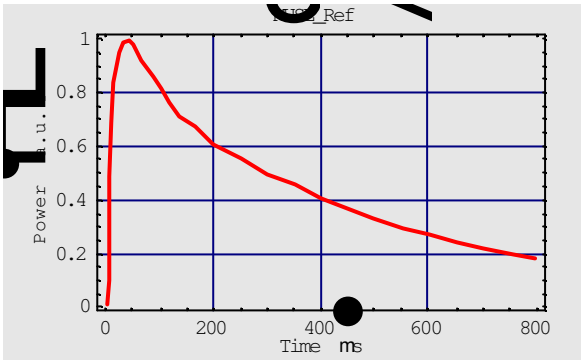


Fig. 3. Respuesta medida en potencia (número de neutrones) a un pulso

En la figura 3 se ha representado la respuesta medida a un pulso de la fuente por un detector de neutrones. Obsérvese que la subida de potencia alcanza un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

orden de magnitud. La caracterización de la respuesta al pulso tiene pues cinco ingredientes: la pendiente de ascenso, el valor del máximo, la pendiente rápida de descenso, la pendiente lenta de descenso y el nivel del fondo. Por tratarse de un reactor muy rápido, la escala temporal del la respuesta al pulso es del orden de 800 µs, que es un tiempo grande comparado con la vida media de los neutrones inmediatos y muy pequeño respecto a la constante de decaimiento de los neutrones diferidos. Dado que el pulso dura en torno a un microsegundo y la multiplicación neutrónica tiene una respuesta de aproximadamente un milisegundo, la frecuencia de pulsos del acelerador es del orden del Khz.

3 SVM MAQUINA DE SOPORTE VECTORIAL

Las máquinas de vectores soportes o SVM (siglas provenientes de "SupportVector Machines") fueron desarrolladas por Vapnik [2] [5] en un principio para clasificación de datos y luego extendidas para su aplicación en problemas de regresión. SVM se basa en el principio de minimización del riesgo estructural (SRM del inglés, "Structural Risk Minimization") y los modelos que obtiene presentan la ventaja de depender únicamente de una pequeña proporción de los datos de entrenamiento, llamados vectores de soporte, (SV por sus siglas en inglés, "Support Vectors"). Los clasificadores y modelos de regresión creados poseen una notable capacidad de generalización, necesitan pocos parámetros de ajuste y la estimación de los parámetros generales se realiza a través de la optimización de una función de coste convexa, lo cual evita mínimos locales. Al depender su solución únicamente de los SV, el modelo final puede ser escrito como una combinación de un número pequeño de vectores de entrenamiento.

Dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento (de muestras) podemos etiquetar las clases y entrenar una SVM para construir un modelo que asigne la clase de una nueva muestra. Intuitivamente, una SVM es un modelo que representa a los puntos de muestra en el espacio, separando las clases por un espacio lo más amplio posible. Cuando las nuevas muestras se ponen en correspondencia con dicho modelo, en función de su proximidad pueden ser clasificadas a una u otra clase.

Más formalmente, una SVM construye un hiperplano o conjunto de hiperplanos en un espacio de dimensionalidad muy alta que puede ser utilizado en problemas de clasificación. Una buena separación entre las clases permitirá una clasificación correcta.

Dado un conjunto de puntos, subconjunto de un conjunto mayor (espacio), en el que cada uno de ellos pertenece a una de dos posibles categorías, un algoritmo basado en SVM construye un modelo capaz de predecir si un punto nuevo (cuya categoría desconocemos) pertenece a una categoría o a la otra.

Como en la mayoría de los métodos de clasificación supervisada, los datos de entrada (los puntos) son vistos como un vector p-dimensional (una lista de p números).

La SVM busca un hiperplano que separe de forma óptima a los puntos de una clase de la de otra, que eventualmente han podido ser previamente proyectados a un espacio de dimensionalidad superior.

En ese concepto de "separación óptima" es donde reside la característica fundamental de las SVM: este tipo de algoritmos buscan el hiperplano que tenga la máxima distancia (margen) con los puntos que estén más cerca de él mismo. Por eso también a veces se les conoce a las SVM como *clasificadores de margen máximo*. De esta forma, los puntos del vector que son etiquetados con una categoría estarán a un lado del hiperplano y los casos que se encuentren en la otra categoría estarán al otro lado.

Los algoritmos SVM pertenecen a la familia de los clasificadores lineales. También pueden ser considerados un caso especial de la regularización de Tikhonov.

En la literatura de los SVMs, se llama *atributo* a la variable predictora y *característica* a un atributo transformado que es usado para definir el hiperplano. La elección de la representación más adecuada del universo estudiado, se realiza mediante un proceso denominado selección de características.

Al vector formado por los puntos más cercanos al hiperplano se le llama vector de soporte.

Los modelos basados en SVMs están estrechamente relacionados con las redes neuronales. Usando una función kernel, resultan un método de entrenamiento alternativo para clasificadores polinomiales, funciones de base radial y perceptrón multicapa.

Existe un número infinito de posibles hiperplanos (líneas) que realicen la clasificación pero, ¿cuál es la mejor y cómo la definimos?

La mejor solución es aquella que permita un margen máximo entre los elementos de las dos categorías.

Se denominan vectores de soporte a los puntos que conforman las dos líneas paralelas al hiperplano, siendo la distancia entre ellas (margen) la mayor posible.

Idealmente, el modelo basado en SVM debería producir un hiperplano que separe completamente los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

datos del universo estudiado en dos categorías. Sin embargo, una separación perfecta no siempre es posible y, si lo es, el resultado del modelo no puede ser generalizado para otros datos. Esto se conoce como sobreajuste (overfitting).

Con el fin de permitir cierta flexibilidad, los SVM manejan un parámetro C que controla la compensación entre errores de entrenamiento y los márgenes rígidos, creando así un margen blando (soft margin) que permita algunos errores en la clasificación a la vez que los penaliza.

La manera más simple de realizar la separación es mediante una línea recta, un plano recto o un hiperplano N-dimensional.

La figura siguiente muestra un ejemplo de separación lineal con SVM. El hiperplano divide las dos clases de objetos maximizando el margen de separación.

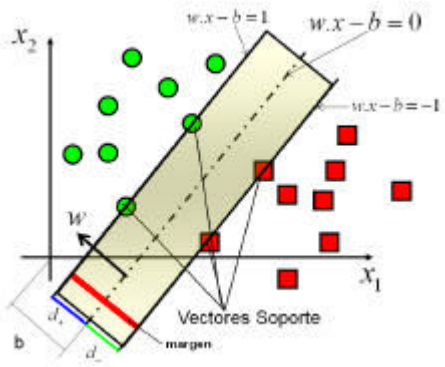


Fig 4 *Ejemplo de separación lineal con SVM. El hiperplano divide las dos clases de objetos maximizando el margen de separación.*

Desafortunadamente los casos a estudiar no se suelen presentar dos dimensiones como, sino que un algoritmo SVM debe tratar con:

a) más de dos variables predictoras,

b) curvas no lineales de separación,

c) casos donde los conjuntos de datos no pueden ser completamente separados,

d) clasificaciones en más de dos categorías.

Debido a las limitaciones computacionales de las máquinas de aprendizaje lineal, éstas no pueden ser utilizadas en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. La representación por medio de funciones Kernel ofrece una solución a este problema, proyectando la información a un espacio de características de mayor dimensión el cual aumenta la capacidad computacional de las máquinas de aprendizaje lineal. Es decir, transformaremos el espacio de entradas X a un nuevo espacio de características de mayor dimensionalidad:

$$F = \{f(x) | x \in X\}$$

$$x = \{x1, x2, \cdots, xn\} \rightarrow f(x) \quad (1)$$

$$f(x) = \{f(x)1, f(x)2, \cdots, f(x)n\}$$

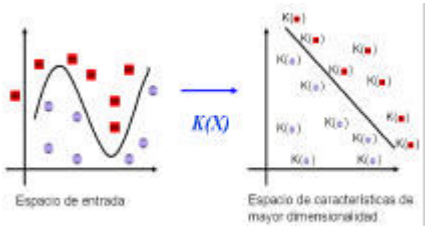


Figura 5: *Utilización de función Kernel. Los datos, no separables linealmente en el espacio de entrada, son transformados a un espacio de mayor dimensionalidad donde puede encontrarse un hiperplano lineal que los divida según su clase.*

Los datos, no separables linealmente en el espacio de entrada, son transformados a un espacio de mayor dimensionalidad donde puede encontrarse un hiperplano lineal que los divida según su clase.

El procedimiento a seguir para la construcción de la máquina de vectores de soporte consta de las siguientes fases.

En este apartado se ordenan y especifican las distintas fases del trabajo desarrollado:

1)Generación de datos: En esta fase inicial, a partir del escenario descrito se obtienen las posiciones de los sensores y su decisión local.

2) Transformación en un paquete apto para SVM: En esta etapa la información recogida localmente debe ser tratada de acuerdo con las necesidades de la SVM y la librería de software que vamos a utilizar.

3) Búsqueda de los parámetros de la SVM. (Validación cruzada): La SVM requiere de una función de núcleo, en nuestro caso será inicialmente el "Kernel" Lineal y posteriormente el Gaussiano. Para entrenar a la máquina de vectores soporte y escoger los parámetros del núcleo que maximizan la precisión nos apoyaremos en la validación cruzada.

4) Entrenamiento: Una vez obtenidos los parámetros que maximizan la precisión, debemos crear un modelo considerando todos los datos del conjunto de entrenamiento. En esta fase es en la que se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

encuentran los vectores soporte que definen la frontera de decisión.

5) Test: Aprovechando el conjunto de datos de test, en esta fase se comprueba si los valores de precisión, sensibilidad y especificidad no varían significativamente o si por el contrario se ha producido un sobreajuste a la hora de generar el modelo.

6) Validación en el escenario: En esta última fase se generan nuevos datos considerando una probabilidad de aparición del blanco. Los datos nos servirán para cotejar los resultados en términos de precisión. Además, los almacenaremos para disponer de ellos en la tarea de estimación.

Una vez más el sistema de aprendizaje elegido fue SVM, especialmente adecuado para la clasificación y cuya facilidad de aplicación, buen rendimiento y disponibilidad en código libre ya fue mencionado en capítulos anteriores. El software público utilizado fue Spider [3]. Una herramienta diseñada para correr en MATLAB. En los primeros meses de 2014 MATLAB ha actualizado su Statistics Toolbox con funciones de cálculo de SVM, lo que hará posible su uso en este tipo de problemas sin necesidad de utilizar software no licenciado por MathWoks.

4 ECUACIONES CINETICAS

Las ecuaciones tradicionales de la cinética de neutrones han de adaptarse a las características del reactor muy subcrítico. La fuente asociada a los neutrones retardados es constante, por lo que la población neutrónica n(t) se estima a partir del valor de fondo; en estas condiciones n(0)=0 y no es necesario contemplar explícitamente a la desintegración de núcleos precursores. Las ecuaciones cinéticas se simplifican considerablemente, convirtiéndose en una ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + S(t) \quad (2)$$

donde los símbolos tienen el significado tradicional, y se asigna a la fuente externa S(t) un perfil gaussiano de la forma:

$$S(t) = S_0 \frac{\exp(-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2})}{\exp(-\frac{\tau^2}{2\sigma^2})} \quad (3)$$

en donde las constantes S_0, τ y σ se obtienen del ajuste a la forma del pulso. En particular, valores aproximados para los parámetros resultan a partir de:

τ, instante del máximo

$n_{max,}$ población neutrónica en el máximo de la respuesta al pulso

$T = -\Lambda/(\rho-\beta)$, derivada logarítmica en la zona de pendiente suave

$S_0 = (dn/dt)_0$, pendiente en el origen

La anchura de la gaussiana se obtiene despejando σ de la ecuación cinética cuando

$$t = \tau \text{ y } n(\tau) = n_{max} ;$$

resulta:

$$\sigma = \frac{\tau}{\sqrt{-2\ln(\frac{n_{max}}{S_0 T})}} \quad (4)$$

En estas condiciones, la solución formal de la ecuación cinética es:

$$n(t) = S_0 e^{\gamma^2} \frac{\sigma}{2}\sqrt{2\pi} e^{-t/T}\left[\text{erf}(\frac{t}{\sigma\sqrt{2}} - \gamma) + \text{erf}(\gamma)\right] \quad (5)$$

siendo erf(x) la función error, y el parámetro adimensional

$$\gamma = 2^{-1/2}(\sigma/T + \tau/\sigma) \quad (6)$$

Obsérvese que $(dn/dt)_0 = S_0$. Para el cálculo rápido de la función error, se puede usar

$$\text{erf}(x) \approx \text{th}(167/148\ x + 11/109\ x^3).$$

Pero esto no será necesario porque el cálculo de la función erf en MATLAB es lo suficientemente rápida para las exigencias de velocidad de cálculo "en línea".

5 ANALISIS PRELIMINAR DE LOS PULSOS

Una vez se haya producido un pulso neutrónico se analizará para comprobar que el acelerador está funcionando correctamente, este análisis se debe efectuar en milisegundos, ya que este es el período entre pulsos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Blázquez [1] demostró que con los cinco valores antedichos (S_0, n_{max}, σ, T, y τ) es posible reconstruir y por lo tanto caracterizar el pulso neutrónico. La forma coincide con la obtenida experimentalmente; sin embargo, hay discrepancias importantes con la duración y anchura del pulso de GENPI, que es del orden de 1μs, mientras que la respuesta tiene una σ de 15 μs; esto es, 6.5 vidas medias de neutrones instantáneos. La interpretación más sencilla es que el reactor necesita un tiempo para alcanzar la multiplicación subcrítica, pues sólo un neutrón de cada 825 neutrones proviene de la fuente.

Se han medido en los pulsos del MUSE los valores que como se ha visto los describen y reconstruyen, estos son:

S_0	en	cuentas/μs
n_{max}	en	cuentas
σ	en	μs
T	en	μs
τ	en	μs

Además se ha comprobado que es posible obtener estos valores en el tiempo indicado. Los cálculos del tiempo del máximo y su valor (τ y n_{max}) son inmediatos, las derivadas T y S_0 son de cálculo muy sencillo y σ es el único cálculo un poco largo para la determinación de los valores a comparar, pero en un ordenador esto no excede de algunos microsegundos.

Con estos valores podremos caracterizar el pulso y así podremos pasar al entrenamiento de la SVM, para lo cual deberemos identificar pulsos válidos y no válidos entre los que poseamos.

6 ENTRENAMIENTO DE LA SVM

Pasamos a continuación al período de entrenamiento de la máquina de soporte vectorial SVM. Dado que no poseemos un número suficiente de impulsos y de estos muy pocos son no aceptables, se hace necesario simular algunos más de estos y así poder preparar las herramientas de clasificación. Por otro lado los impulsos del MYRRHA no estarán disponibles hasta dentro de algún tiempo. Luego el objetivo de nuestro trabajo ha sido modelar y entrenar las herramientas de la SVM con estos pulsos reales y simulados del conjunto GENEPI-MUSE a fin de tener los programas de la SVM preparados para la fase de arranque del MYRRHA. Estos programas que han sido probados con estos pulsos reales y simulados nos permitirán preparar las técnicas de entrenamiento de la SVM para la determinación de los pulsos anormales y con ello poder diagnosticar el estado del ADS y así corregir posibles anormalidades en su funcionamiento. La discriminación en la SVM entrenada es muy rápida por lo que determinar si un pulso es aceptable, no excederá de algunas decenas de microsegundos, muy lejos de los cientos que disponemos entre pulsos

7 CONCLUSIONES

El análisis de los pulsos neutrónicos en un ADS, puede usarse para el control del perfecto funcionamiento del acelerador. Para ello se ha usado la posibilidad de reconstrucción del pulso neutrónico por medio de cinco parámetros (S_0, n_{max}, σ, T, y τ), que son fácilmente calculables. Usando una máquina SMV (Maquina de soporte vectorial) es posible diagnosticar la bondad y utilidad de los pulsos, y así poder diagnosticar el correcto funcionamiento del acelerador del ADS.

REFERENCIAS

1. Blázquez J., "*Respuesta a un pulso gaussiano en la cinética de los ADS*", 30 Reunión de la Sociedad Nuclear Española, Alicante Octubre 2004

2. Corinna Cortes and V. Vapnik, *"Support-Vector Networks"*, Machine Learning, 20. 1995.

3. Max-Planck Institute for biological Cybernetics, Tuebingen, Alemania. *"The Spider - A machine learning in Matlab"*. http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/bs/people/spider/main.html

4. Soule R. González-Romero E., *"The MUSE experiments for subcritical neutronics validation and proposal for a computer benchmark on simulation of MASURCA critical and subcritical experiments"*, OECD, Sixth Information and Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Madrid, Spain, 11-13 dec. (2000).

5. Statistics Toolbox. MATHLAB. R2014a. MathWorks. 2014.

6. V. Vapnik. *"The Nature of Statistical Learning Theory"*. Springer, Second Edition. 2000

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ESTIMACIÓN DEL PAR ARTICULAR GENERADO POR ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA NEUROMUSCULAR MEDIANTE UN MODELO FISIOLÓGICO SIMPLIFICADO

Elisa Piñuela Martín, Antonio J. del-Ama, Ángel Gil-Agudo
Unidad de Biomecánica. Hospital Nacional de Parapléjicos (SESCAM). Finca La Peraleda S/N, 45071, Toledo
epinuela@externas.sescam.jccm.es

Resumen

En el presente documento se expone el diseño y validación de un modelo de Estimulación Eléctrica Neuromuscular para la relación entre parámetros de estimulación y par articular. El enfoque elegido para el diseño del modelo es fisiológico, con representación de las características internas del sistema y contemplando un número de simplificaciones adecuado para facilitar su identificación y comprensión. Se ha diseñado y ejecutado un protocolo para la realización de todos los ensayos necesarios. Por último, se presentan los resultados obtenidos de su caracterización en un sujeto sano, identificando sus limitaciones para ser utilizado como estimador en lazo abierto, pero poniendo de manifiesto su aplicabilidad al estudio e implementación de controladores basados en este modelo para movimientos funcionales.

Palabras Clave: modelo, lesión medular, Estimulación Eléctrica Neuromuscular, rehabilitación.

1 INTRODUCCIÓN

La Estimulación Eléctrica Neuromuscular (E.E.N.M.) es una técnica habitualmente utilizada para la rehabilitación de las funciones motoras en pacientes con lesión medular. Consiste en la aplicación de pulsos eléctricos sobre los tejidos musculares para lograr su contracción. Sin embargo, este fenómeno es no lineal y muy variante con el tiempo. Estas limitaciones impiden el uso extendido de la E.E.N.M. para la rehabilitación o compensación de movimientos en pacientes con lesión medular. El modelado matemático es una herramienta valiosa para la optimización de la fuerza muscular y la generación de movimiento en este tipo de aplicaciones, permitiendo realizar un control preciso del movimiento articular y/o fuerza muscular.

Los modelos de E.E.N.M. describen de forma detallada los procesos que ocurren dentro de las fibras musculares [2], [3], [7]. De forma general, este tipo de modelos suelen necesitar una gran cantidad de parámetros y algunos de ellos son complicados de obtener de forma directa. En todos los casos es necesario recurrir a experimentos que podrían ser largos y complejos y además, debido a su alto grado de detalle sólo pueden emplearse como plantas de simulación. A cambio permiten el conocimiento y acceso a las variables internas que involucran la activación muscular artificial bajo E.E.N.M.

Una alternativa es el diseño de modelos fisiológicos simplificados [1], de forma que puedan ser manejados e identificados cómodamente, con una estructura sencilla permitiendo la posibilidad de ser utilizado como controlador. El principal inconveniente es encontrar la configuración de experimentos óptima para la obtención de parámetros y que la pérdida de detalle sobre las características internas del sistema puede reducir su precisión.

Conseguir modelar un sistema tan complejo y no lineal como es el de activación muscular bajo estimulación eléctrica es muy difícil, existen variedad de estrategias en la literatura, por lo que no existe una solución única y encontrar la más adecuada es una tarea larga y costosa. De forma general, si sólo interesan las entradas y salidas del sistema, un modelo en caja negra puede ser la mejor opción [5]. En cambio, si se pretenden entender los componentes internos y efectos asociados del sistema, se debe utilizar un modelo más complejo y basado en los efectos fisiológicos, con un enfoque reduccionista si se quiere orientar al control. Un modelo más sofisticado será capaz de replicar mejor el comportamiento real del sistema con un grado de operación mucho más amplio, pero a cambio surgirán complicaciones a la hora de identificar y validar el modelo e interpretar los resultados [9].

El objetivo de este estudio es el diseño y validación de un modelo para predecir el par articular producido por E.E.N.M. Dadas las limitaciones mencionadas e inherentes del sistema muscular bajo estimulación

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

eléctrica, se debe añadir la dificultad de modelado en sujetos con lesión medular. En este estudio se presenta la identificación del modelo en un sujeto sano como paso previo a la identificación en sujetos con lesión medular.

2 MODELIZACIÓN DE LA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA NEUROMUSCULAR

Para el desarrollo del modelo se ha tomado como referencia el modelo presentado por Ferrarin [1], el cual estima el ángulo producido en la rodilla en los cuádriceps para movimientos de extensión con modulación de ancho de pulso. Este será el escenario elegido para este estudio.

En este caso, la variable buscada es el par activo articular, ya que es el fenómeno físico directo que produce movimiento articular y el desarrollo de controladores basados en modelos cuya salida es el par, permite realizar un control más óptimo de la fuerza muscular. Por ello, se ha desacoplado el modelo para obtener un *modelo de E.E.N.M.* (Figura 1) para obtener la relación entre ancho de pulso de estimulación y par activo en la rodilla, formado por los bloques de activación y contracción dinámica.

Figura 1: Esquema de entradas y salidas del modelo de E.E.N.M.

Por otro lado, como la salida del modelo es el par activo en la rodilla y esta magnitud no puede ser obtenida experimentalmente, es necesario recurrir a un *modelo biomecánico auxiliar* (Figura 2) para obtener una estimación del par a partir del ángulo medido experimentalmente de forma que pueda ser comparado con el estimado por el *modelo de E.E.N.M.*. Este modelo ha sido obtenido de la inversión del bloque de dinámica segmental del modelo de Ferrarin [1], adaptando sus características al sistema de referencia utilizado para este estudio (Figura 3).

Figura 2: Esquema de entradas y salidas del modelo biomecánico

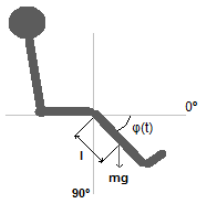


Figura 3: Sistema de referencia utilizado

2.1 MODELO DE E.E.N.M

La estructura interna correspondiente a este modelo se muestra en la Figura 4. Dentro de este modelo, se distinguen tres características: *activación dinámica* que representa la capacidad de generación de fuerza del musculo, la *relación par-ángulo* y la *relación par-velocidad*. Estas dos últimas representan la contracción y relajación mecánica del músculo.

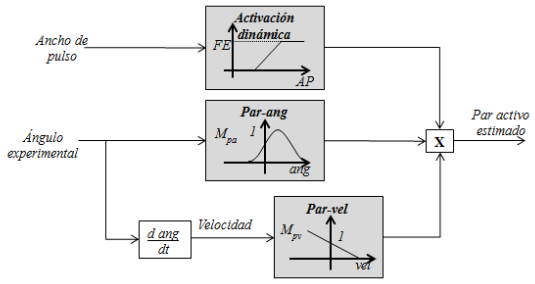


Figura 4: Estructura interna del modelo de E.E.N.M.

El par activo estimado en la rodilla, se obtiene del producto de las salidas de los tres bloques que forman el modelo (1).

$$M_{act} = Act \cdot M_{pa} \cdot M_{pv} \tag{1}$$

El bloque de *activación dinámica* representa la característica de reclutamiento, definida como la relación entre ancho de pulso y activación muscular. Se ha modelado con una función lineal a trozos (2) caracterizada con tres parámetros: *Umb [μs]* representa el ancho de pulso a partir del cual se empieza a generar fuerza, *Sat [μs]* el ancho de pulso de saturación a partir del cual no se genera más fuerza y se mantiene constante y *FE [Nm]* el valor máximo de par correspondiente a *Sat*.

$$\begin{cases} Act = 0, & para\ AP \le Umb \\ Act = \dfrac{Fs}{(Sat - Umb)}(AP - Umb), & para\ Umb < AP < Sat \\ Act = Fs, & para\ AP \ge Sat \end{cases} \tag{2}$$

La *relación par-ángulo* describe la capacidad de generar fuerza en función de la posición y está modelada a partir de la relación fuerza-longitud de Hatze [2]. Su expresión se corresponde con una función Gaussiana normalizada (3).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$M_{pa} = exp\left\{-\left(\frac{\varphi - K_1}{K_2}\right)^2\right\} \quad (3)$$

La formulación de esta característica deriva de la aproximación lineal de fuerza-velocidad descrita por Zajac [10], donde los parámetros del músculo y la articulación se concentran el parámetro único K_3 (4).

$$M_{pv} = 1 + K_3\dot{\varphi}(t) \quad (4)$$

Este parámetro ha sido obtenido directamente de información encontrada en la literatura [1], debido fundamentalmente a su complejidad [6].

Tanto la relación *par-ángulo* como la de *par-velocidad* están normalizadas entre 0 y 1.

2.2 MODELO BIOMECÁNICO AUXILIAR

La estructura interna de este modelo es la mostrada en la Figura 5. Está formado por cuatro componentes: par inercial, par viscoso, par elástico y par gravitacional.

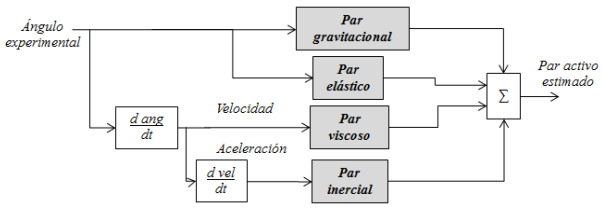


Figura 5: Estructura interna del modelo biomecánico

El par inercial es obtenido a partir del momento de inercia (J) y la aceleración (5).

$$M_{tot} = \frac{d\Gamma(t)}{dt} = J \cdot \ddot{\varphi}(t) \quad (5)$$

El par viscoso depende de la velocidad y se modela con una función lineal (6).

$$M_{vis} = B\,\dot{\varphi}(t) \quad (6)$$

El par elástico se modela con una función exponencial doble (7).

$$M_{ela} = a \cdot exp\big(b \cdot \varphi(t)\big) + c \cdot exp(d \cdot \varphi(t)) \quad (7)$$

Por último, el par gravitacional depende de la posición angular y se calcula mediante la expresión caracterizada por los parámetros de masa de la pierna (m), longitud del segmento (l) y aceleración de la gravedad (g) (8).

$$M_{grav} = mgl\cos\varphi(t) \quad (8)$$

El par activo resulta la suma de estas cuatro componentes (9).

$$M_{act} = M_{ela} + M_{vis} + M_{grav} + M_{tot} \quad (9)$$

3 EQUIPAMIENTO

Para la realización de los experimentos se han empleado electrodos rectangulares *ValuTrode* (5x9cm), estimulador *Rehastim* de *Hasomed* controlado en Simulink mediante comunicación USB, máquina de ejercicios isocinéticos KinCom para los ensayos isométrico e isocinético, y una plataforma de adquisición de datos sincronizada con el estimulador para la detección del inicio de la estimulación que ha sido específicamente diseñada para esta aplicación (Figura 6).

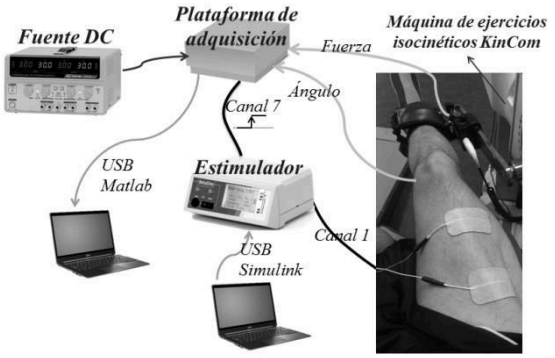


Figura 6: Esquema de configuración del procedimiento experimental aplicado

El cálculo de parámetros y la simulación e implementación del modelo se ha realizado en el entorno *Matlab Simulink*.

4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento desarrollado se ha dividido en 3 fases: entrenamiento, identificación y validación. La primera consiste en la aplicación de series de estimulación para identificar la máxima corriente tolerada por el sujeto, la fase de identificación consiste en la realización de los ensayos necesarios para la identificación de los parámetros que forman los modelos de E.E.N.M. y biomecánico. Finalmente, en la fase de validación se registran los movimientos producidos en la rodilla bajo unos perfiles de estimulación determinados para comparar los pares de los dos modelos y discutir los resultados. En todas las fases el sujeto se debe sentar en un banco, de forma que pueda mover la pierna libremente y con la musculatura lo más relajada posible, evitando cualquier movimiento voluntario.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.1 FASE DE IDENTIFICACIÓN

Dentro de esta fase hay tres ensayos: dos de ellos para la identificación de las características pasivas de la rodilla incluidas dentro del modelo biomecánico (elasticidad y viscosidad), que son el *ensayo de péndulo pasivo* y *ensayo isocinético pasivo*. El último ensayo es el de *estimulación bajo condiciones isométricas*, que se utiliza para la identificación de la *activación dinámica* y la *relación par-ángulo*.

Para el *ensayo de péndulo pasivo*, el examinador sujeta la pierna en extensión total y la deja caer mientras se registran los movimientos hasta la posición de reposo. Con los datos obtenidos, se calcula el parámetro de viscosidad (*B*) de (6).

El *ensayo isocinético pasivo* consiste en sujetar la espinilla a un soporte, programado para mover la pierna desde la posición de reposo hasta extensión total a velocidad constante y baja (5º/s) mientras se mide la resistencia al movimiento de la rodilla (fuerza) y ángulo. Mediante este ensayo se obtienen los parámetros de elasticidad de la articulación (*a*, *b*, *c* y *d*) de la curva de par elástico (7).

En el *ensayo bajo condiciones isométricas*, se sujeta la espinilla a un soporte manteniendo el ángulo de la rodilla fijo. La fuerza se mide mientras se aplica una rampa ascendente de ancho de pulso (Figura 7), repitiendo este procedimiento en 6 posiciones angulares (90º, 70º, 60º, 50º, 45º y 30º). Con este ensayo se obtiene la característica *activación dinámica* (2) y la *relación par-ángulo* (3).

Figura 7: Perfil de estimulación aplicado en ensayo bajo condiciones isométricas

4.2 FASE DE VALIDACIÓN

Esta fase consiste en la aplicación de series de estimulación eléctrica con tres patrones de ancho de pulso. La aplicación de las series de estimulación se realiza dos veces: una antes de realizar los ensayos de identificación de parámetros (fase A) y otra después (fase E), para comprobar el fenómeno de fatiga. Las variables registradas son el ancho de pulso aplicado y las posiciones angulares resultantes.

Se han elegido dos perfiles senoidales de diferente amplitud (Figura 15 y Figura 18) para evaluar la respuesta del modelo ante cambios rápidos de ancho de pulso y comprobar la influencia de los umbrales de activación. Por otro lado, se emplea un perfil trapezoidal (Figura 21) para el estudio del comportamiento del modelo en condiciones cuasiestáticas con cambios de ancho de pulso mucho más lentos.

5 RESULTADOS

El procedimiento experimental expuesto en el apartado anterior se ha realizado en un sujeto sano, cuyos datos generales se muestran en la Tabla 1**.**

Tabla 1: Datos generales del sujeto

Sexo	Masculino
Edad	35
Peso (kg)	83
Altura (m)	1,81

5.1 MODELO DE E.E.N.M.

Con respecto a la identificación de los parámetros de activación dinámica, en la Figura 8 se muestran las curvas de reclutamiento obtenidas del ensayo bajo condiciones isométricas en las diferentes posiciones.

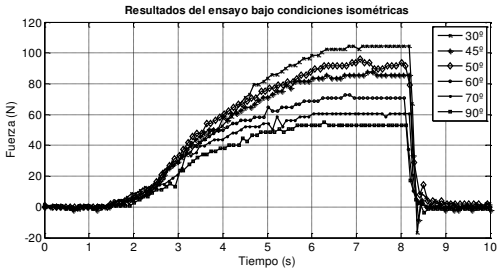


Figura 8: Curvas de reclutamiento

Cada una de estas curvas se ajusta a tramos lineales, tal y como se indica en la Figura 9, obteniendo para cada una los anchos de pulso umbral y saturación y el valor máximo de par. De esta forma se obtiene el parámetro *Umb* y *Sat* (2) como la media de todos los obtenidos en las seis posiciones, y el parámetro *FE* (2) como el máximo de los valores máximos de par para cada posición angular.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

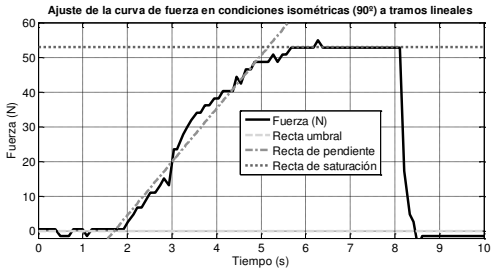


Figura 9: Ajuste de las curvas de reclutamiento Relación par-ángulo

Para el cálculo de los parámetros de la relación par-ángulo (3), se necesitan los valores de par correspondientes a un ancho de pulso menor o igual al menor de los anchos de pulso de saturación obtenidos en las seis posiciones del *ensayo bajo condiciones isométricas*, en este caso se obtuvo 300µs. Los valores de par para dicho ancho de pulso se obtienen cruzando los datos de ancho de pulso (Figura 7) con los de la curva de reclutamiento correspondiente (Figura 8).
Estos valores se ajustan a una función Gaussiana normalizada (Figura 10), obteniendo directamente los parámetros K_1 y K_2 (Tabla 2) de la ecuación (3).

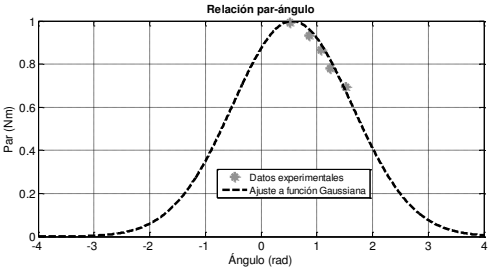


Figura 10: Ajuste de la relación par-ángulo

Los valores de los parámetros que caracterizan este modelo, obtenidos para este sujeto se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del modelo de E.E.N.M.

Parámetros del modelo de E.E.N.M.		
Corriente de estimulación (mA)		30
Activación dinámica	**Umb (µs)**	128,28
	Sat (µs)	392,19
	FS (Nm)	34,45
Par-ángulo	**K1 (rad)**	0,56
	K2 (rad)	1,53
Par-velocidad	**K3 (rad^{-1}s)**	0,04

5.2 MODELO BIOMECÁNICO AUXILIAR

Los parámetros de masa de la pierna (*m*), longitud del centro de masa (*l*) y momento de inercia (*J*), necesarios para el cálculo del par gravitacional (8) e inercial (9), se han extraído a partir de la masa y altura del sujeto mediante expresiones tabuladas tomadas de la literatura [8].

Para la identificación del coeficiente de viscosidad *B* de (6) se ha obtenido la respuesta temporal en ángulo correspondiente al *ensayo de péndulo pasivo*, mostrada en la Figura 11.

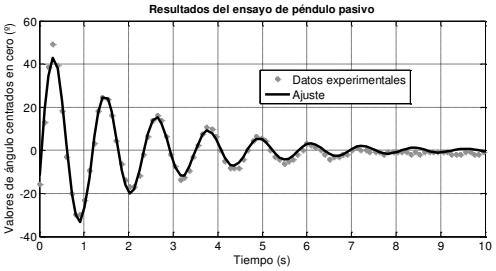


Figura 11: Respuesta temporal del ensayo de péndulo pasivo

Esta curva ha sido ajustada a una función de respuesta de un sistema de segundo orden amortiguado [4], obteniendo directamente el parámetro *B* como el coeficiente de amortiguamiento.
A partir de los datos de fuerza y ángulo recogidos en el *ensayo isocinético pasivo*, se ha obtenido la curva de par elástico multiplicando los valores de fuerza por la longitud del brazo de palanca (distancia desde el eje de la rodilla hasta la posición del sensor) y restando el par gravitacional, calculado mediante (8). Posteriormente, estos datos han sido ajustados a una función exponencial doble (7), tal y como se muestra en la Figura 12, obteniendo los parámetros *a*, *b*, *c* y *d*. En la Tabla 3 se muestran los valores numéricos para caracterizar el modelo biomecánico en este sujeto.

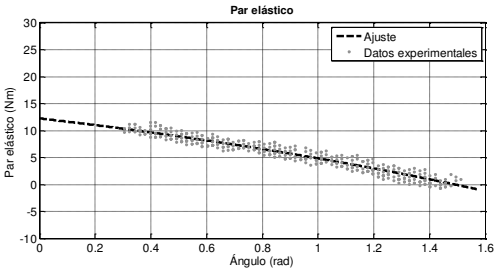


Figura 12: Ajuste del par elástico

Tabla 3: Parámetros del modelo biomecánico

Parámetros del modelo biomecánico		
Datos antropométricos	**J (kg m^2)**	0,48
	m (kg)	5,06
	l (m)	0,25
Viscosidad	**B (N s/m)**	0,41
Elasticidad	**a**	16760,00
	b	1,18
	c	-16750,00
	d	0,18

5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez obtenidos todos los parámetros de los dos modelos, se han simulado con los datos recogidos en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

las dos fases (A y E) de validación para los tres perfiles mencionados en el apartado 4.2.

5.3.1 Perfil senoidal de 200μs

En la Figura 13 se muestran los resultados de las variables internas del modelo de E.E.N.M. para esta entrada. En la parte izquierda superior está representada la *relación par-ángulo* y en la inferior, la *relación par-velocidad*. La gráfica de la derecha muestra la salida del bloque de *activación dinámica*.

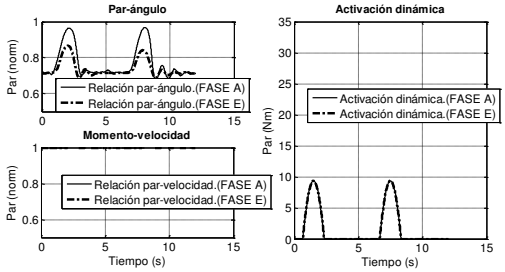


Figura 13: Resultados de las variables internas del modelo de E.E.N.M. para seno positivo de 200μs

La *relación par-velocidad* permanece constante en todo el intervalo, con un valor unitario, por lo que su influencia en la salida del modelo es mínima por la ecuación (4).

En la Figura 14 se muestran los resultados de las variables internas del modelo biomecánico para esta entrada. En la gráfica superior se han representado de forma conjunta las curvas de par elástico y gravitacional y en la gráfica inferior, los pares viscoso e inercial.

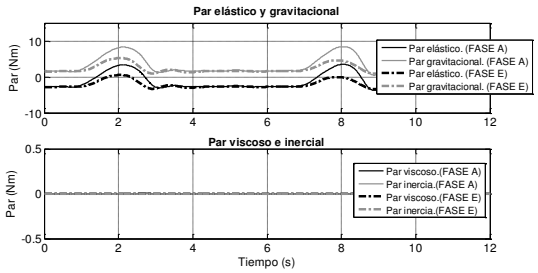


Figura 14: Resultados de las variables internas del modelo biomecánico para seno positivo de 200μs

Las curvas de par elástico y gravitacional en los tramos estacionarios tienen aproximadamente el mismo valor pero de signo contrario debido a la compensación producida con la pierna en reposo, este mismo efecto se comprueba en los dos casos siguientes. Por otro lado, los resultados de los pares inercial y viscoso no influyen en el par resultante, ya que se encuentran cercanos a cero en todos los instantes.

Por último, en la Figura 15 se muestran los resultados de par del modelo biomecánico auxiliar y de E.E.N.M. (gráfica inferior), junto con el perfil de estimulación aplicado y la respuesta en ángulo obtenida.

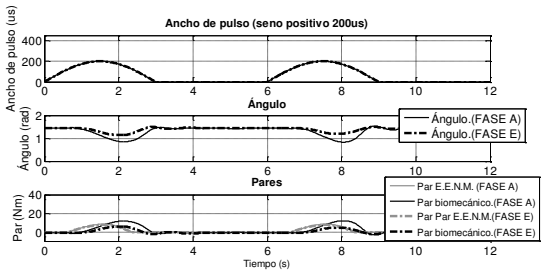


Figura 15: Resultados de validación del modelo para seno positivo de 200μs

5.3.2 Perfil senoidal de 400μs

Siguiendo el mismo esquema que en el apartado anterior, en la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se muestran los resultados para el segundo perfil senoidal aplicado. Se han suprimido las gráficas de la relación par-velocidad, y los pares viscoso e inercial ya que su influencia en los resultados es despreciable.

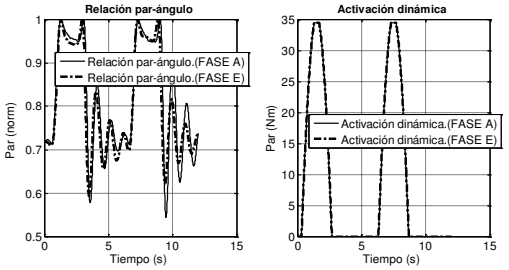


Figura 16: Resultados de las variables internas del modelo de E.E.N.M. para seno positivo de 400μs

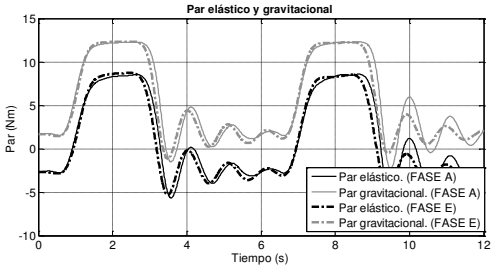


Figura 17: Resultados de las variables internas del modelo biomecánico para seno positivo de 400μs

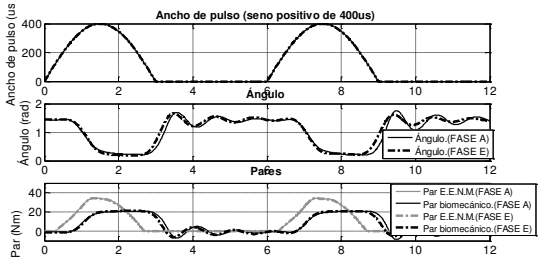


Figura 18: Resultados de validación del modelo para seno positivo de 400μs

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En este caso, al ser la amplitud de ancho de pulso mayor que en el perfil anterior, los movimientos producidos son más amplios alcanzando prácticamente la extensión total de la rodilla, y por consiguiente los pares también. Además, existe un retardo significativo entre el par resultante del modelo de E.E.N.M. y biomecánico, además de diferencias de magnitud significativas.

5.3.3 Perfil trapezoidal

Los resultados del tercer y último perfil de estimulación aplicado se muestran en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21. La dinámica de este perfil es diferente a los dos anteriores, ya que éste presenta una dinámica rectilínea y mucho más lenta (Figura 21).

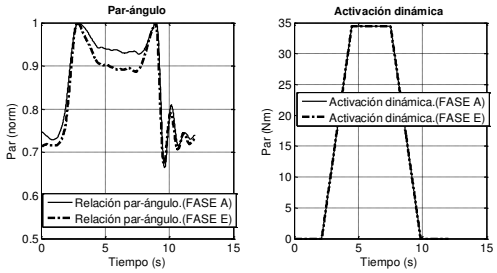


Figura 19: Resultados de las variables internas del modelo de E.E.N.M. para perfil trapezoidal

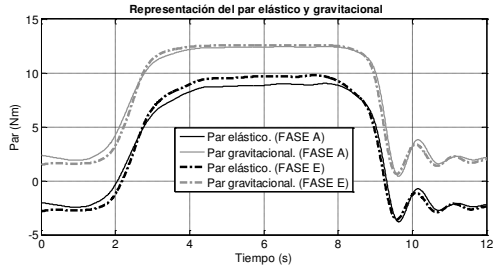


Figura 20: Resultados de las variables internas del modelo biomecánico para perfil trapezoidal

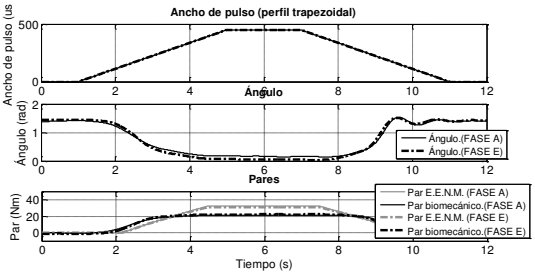


Figura 21: Resultados de validación del modelo para perfil trapezoidal

A diferencia de los dos casos anteriores, no existe retardo entre las curvas de par.

5 DISCUSIÓN

Con respecto al modelo de E.E.N.M., se ha observado levemente el efecto de la fatiga. En la función senoidal de 200μs se observan diferencias en la respuesta angular de las fases A y E (Figura 15), que no han sido detectadas por el modelo debido al ajuste en la característica par-ángulo. La dispersión de la curva ajustada (K_2 de la Tabla 2) parece elevada y provoca que las variaciones de par con respecto al ángulo sean menos acusadas.

El retardo de los pares en los dos perfiles senoidales (Figura 15 y Figura 18) se debe a la dinámica de estimulación aplicada en el ensayo bajo condiciones isométricas (Figura 7). En los perfiles senoidales la tasa de incremento de ancho de pulso es mayor que en la rampa empleada en este ensayo, esto provoca que los parámetros *Umb* y *Sat* calculados (Tabla 2) no se correspondan con esta dinámica, produciendo el adelanto del par del modelo de E.E.N.M. Se puede observar que no ocurre así en el caso del perfil trapezoidal (Figura 21), donde las pendientes de subida y bajada de ancho de pulso son similares. Es decir, cuanto más similar es el perfil para validar el modelo al empleado para su identificación, se produce menor retardo entre los pares y más fiables son los parámetros de activación dinámica calculados.

En lo que se refiere al modelo biomecánico, se asume la fiabilidad de los cálculos de par gravitacional, ya que están basados en los datos experimentales de ángulo y en parámetros constantes calculados a partir de la antropometría del sujeto [8]. La característica determinante de este modelo es, por tanto el par elástico. En la Figura 12 se observa un tramo entre 0 y 0,3 radianes en el cual no existen datos experimentales, esto crea una región de incertidumbre en el ajuste de los datos. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 18 y Figura 21, en la cual el par resultante de este modelo está subestimado con respecto al del modelo de E.E.N.M. En las restantes posiciones angulares, la estimación es aceptable ya que en reposo, el par elástico y gravitacional deben tener el mismo valor absoluto y signo contrario, se equilibran las fuerzas de forma que la resultante es nula.

6 CONCLUSIÓN

Modelar un sistema como es el de la activación muscular basándose en los procesos fisiológicos obliga a hacer simplificaciones o a seleccionar de entre todos fenómenos que involucran esta dinámica, los que se consideran más influyentes para calcular los pares articulares con la pérdida de información que esto supone.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El modelo aquí presentado tiene como variable de análisis el par, la no disponibilidad de datos experimentales ha obligado a utilizar e identificar un modelo biomecánico, lo que ha supuesto una limitación importante al validar el modelo basándose en dos estimaciones diferentes. La mejora de los procedimientos de identificación de este modelo auxiliar permitiría la discusión más detallada de los resultados obtenidos.

Si bien se ha podido concluir que el modelo aquí presentado tiene unas prestaciones modestas, el procedimiento experimental desarrollado ha permitido profundizar en el conocimiento de la dinámica y características de la activación muscular bajo E.E.N.M. Se considera que esta es la base para el diseño de modelos más complejos, con rangos más amplios de movimientos, extendidos a más articulaciones y que vayan enfocados al control de movimientos funcionales, tales como la marcha pudiendo ser integrados en neuroprótesis.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a través de la financiación del proyecto BioMot, 7FP, ref. (611695, 7FP) y el proyecto HYPER, CONSOLIDER INGENIO 2010.ref. CSD2009-00067.

Referencias

[1] M. Ferrarin, F. Palazzo, R. Riener, and J. Quintern, "Model-based control of FES-induced single joint movements.," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 245–57, Sep. 2001.

[2] H. Hatze, "A comprehensive model for human motion simulation and its application to the take-off phase of the long jump," *J. Biomech.*, vol. 14, no. 3, pp. 135–142, 1981.

[3] A. HUXLEY, "Muscle structure and theories of contraction," *Prog. Biophys. Biophys. Chem*, vol. 7, pp. 255–318, 1957.

[4] K. Ogata, *Sistemas de control tiempo discreto 2ED*. 1996.

[5] F. Previdi, "Identification of black-box nonlinear models for lower limb movement control using functional electrical stimulation," *Control Eng. Pract.*, vol. 10, no. 1, pp. 91–99, 2002.

[6] R. Riener, C. Bioingegneria, F. Projuventute, D. Gnocchi, P. Milano, and V. Capecelatro, "Model-based development of neuroprostheses for paraplegic patients," 1999.

[7] R. Riener and J. Quintern, "A physiologically based model of muscle activation verified by electrical stimulation," *Bioelectrochemistry Bioenerg.*, vol. 43, pp. 257–264, 1997.

[8] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 2009.

[9] J. M. Winters, "An improved muscle-reflex actuator for use in large-scale neuromusculoskeletal models," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 359–374, Jul. 1995.

[10] F. E. Zajac, "Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control.," *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 359–411, Jan. 1989.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES ANTE FALLOS ESPORÁDICOS

Manuel A. Hernández-Mejías. Antonio Sala
maher3@upv.es. asala@isa.upv.es ; Universitat Politecnica de Valencia

Andrés Querol. Carlos Ariño.
andres.querol@uji.es. arino@uji.es; Universitat Jaume I, Castellón de la Plana

Resumen

Este trabajo considera el análisis de confiabilidad de sistemas lineales sujetos a restricciones (estados y acción de control) con múltiples modos de operación debido a fallos esporádicos. Estos fallos pueden ser debido por ejemplo, en sistema en red, a perdidas de paquetes de datos con una cierta probabilidad asociada. Se considera que el sistema falla cuando se alcanza determinada región del espacio de estados no admisible. Un controlador de alta confiabilidad tendrá una probabilidad muy baja de alcanzar dicha región inadmisible. El objetivo del trabajo es dar una cota mínima del tiempo medio hasta el fallo en determinadas condiciones iniciales.

Palabras clave: Fallos esporádicos, tiempo medio entre fallos, confiabilidad de sistemas de control, control en red

1. Introducción

El control tolerante a fallos [2, 6, 5] es importante en las aplicaciones prácticas. En muchos casos, los fallos son inevitables a largo plazo y, de alguna manera, el objetivo del diseño es encontrar un esquema de control que garantice un elevado tiempo en funcionamiento. El MTBF por su acrónimo en inglés *Mean Time Between Failure*, es el tiempo medio transcurrido entre fallos inherentes de un sistema durante su funcionamiento [4]. El evento que se considera "fallo" en un sistema depende de la aplicación concreta.

El MTBF se ha utilizado durante muchos años como fundamento para la toma de decisiones [8]. Se han desarrollado innumerables métodos y herramientas para predecir la vida útil de productos. Dicho MTBF constituye una medición fundamental de la confiabilidad de un sistema dado. Este suele estar expresado en unidades de tiempo y es evidente que a mayor MTBF, mayor será la confiabilidad del sistema.

En algunos casos, un "fallo" puede ser esporádico, de modo que el sistema vuelve a su estado normal con alta probabilidad sin ninguna acción adicional. Ejemplo de esta situación puede encontrarse en sistemas en red [7], en donde se pierden paquetes de datos de información con cierta probabilidad [9].

Para estos sistemas, es usual considerar fallos aquellas situaciones en donde haya pérdida de comunicación la cual imposibilite la transmisión de datos por la red de comunicación, estos datos pueden ser la acción de control a aplicar al proceso o una lectura de sensor de dicho proceso (ver Figura 1). Si se sabe con cierta probabilidad conocida, con qué frecuencia ocurren los fallos en la red, es posible realizar un análisis de confiabilidad para determinar las probabilidades de fracaso o de funcionamiento del proceso, para posteriormente conseguir calcular un estimado del MTBF del sistema, objetivo principal del presente trabajo.

En este caso, aunque una pérdida de datos es un "fallo" de la red, éste es "recuperable"; el fallo último (no recuperable) del sistema controlado se definirá como la violación de determinadas restricciones en el estado fijadas a priori. El objetivo del trabajo será determinar una cota mínima del MTBF (violación de restricciones) dado un conjunto de condiciones iniciales posibles para un sistema con varios modos de funcionamiento. Un ejemplo de una situación con fallo de recepción de paquete de actuador será usado para ilustrar los resultados; otros desarrollos contemplando control tolerante a fallos de actuador pueden consultarse en [1, 3, 5, 6].

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: La siguiente sección discute los preliminares y notación acercas sistemas lineales con fallos esporádicos, así como también la definición del mean time between failure (MTBF) finalizando con el planteamiento del problema. La sección 3 presenta los principales resultados de este trabajo, analizando la confiabilidad para sistemas estocásticamente estable vía un algoritmo, el cual calcula las probabilidades de que el estado deje o entre cierto conjunto dado y, presenta un método de obtener el MTBF a partir de estas probabilidades. La sección 4 presenta un ejemplo y se finaliza un una sección de conclusiones.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

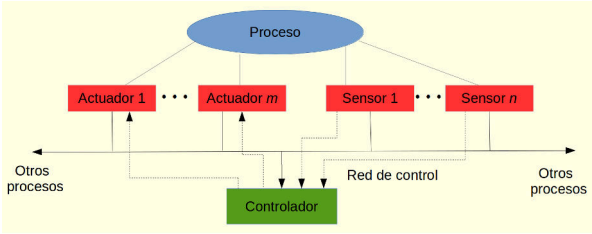


Figura 1: Ejemplo de un sistema de control en red.

2. Preliminares y Notación

Considérese un sistema lineal dado por:

$$x_{t+1} = A_{\theta(t)}x_t + B_{\theta(t)}u_t \tag{1}$$

sujeto a:

$$x_t \in \Omega_{max} \tag{2}$$

donde Ω_{max}, es un politopo convexo y cerrado de $\mathbb{R}^n$, el cual contiene el origen en su interior. x_t y $u_t \in \mathbb{R}^m$ son los estados y entradas del sistemas respectivamente. $\bar{\mathcal{A}} = \{A_1, \ldots, A_M\}$ y $\bar{\mathcal{B}} = \{B_1, \ldots, B_M\}$ son las llamadas matrices del modelo y la variable modo $\theta(t) \in \mathcal{I}$, $\mathcal{I} = \{1, \ldots, M\}$, es una variable aleatoria discreta con un vector de probabilidad de cada modo dada por $\mathbb{P} = [P_1, \ldots, P_M]$.

Se asume que para todo tiempo t, que existe algún diagnosticador externo tal que el modo en el que se encuentra el sistema $\theta(t)$ es conocido, así como también los estados de la planta x_t y el vector de probabilidad de modos $\mathbb{P}$.

La notación $\{\theta\}_t^{t+h}$ denotará una secuencia de variables aleatorias $\theta(k)$ desde $k = t$ hasta $k = t+h$, $h \geq 0$.

Si la probabilidad de fallar en un instante t dado de un sistema es $f(t)$, el MTBF viene dado por:

$$MTBF = \sum_{t=0}^{\infty} t * f(t)$$

obviamente, una definición integral con funciones de densidad análoga puede ser definida para el caso continuo, que no entra dentro de los objetivos de este trabajo.

2.1. Planteamiento del Problema

Se asumirá que violar restricciones de estados Ω_{max} para sistemas lineales con fallos esporádicos en presencia de cierta ley de control, será un situación a ser evitada, dado que tal situación será considerada como un fallo no recuperable en el sistema.

El objetivo de este trabajo es evaluar la confiabilidad de un conjunto de condiciones iniciales dado, Ω, en el sentido de calcular un estimado "peor-caso" del MTBF. El estimado es conservador porque el MTBF depende de la distancia a las restricciones será diferente: nos basaremos en los vértices de Ω, pero puntos cercanos al origen tendrán, evidentemente, un MTBF mucho mayor.

3. Resultados principales

La aportación de este trabajo se basa en un primer resultado inicial: partiendo desde un conjunto de restricciones y, un subconjunto cualquiera de éste (Ω), se desea conocer con que probabilidad las trayectorias de un sistema bajo cierta ley de control y un horizonte prefijado, violan las restricciones impuestas, cuando el estado inicial del sistema pertenece a dicho Ω, o la probabilidad de que las trayectorias pertenezcan a Ω luego de exactamente H pasos. A continuación se presentan el estudio para el obtención de dichas probabilidades con el fin de calcular el MTBF de dicho sistemas en un segundo paso.

3.1. Probabilidad de fallo a horizonte prefijado

Es bien sabido que *estabilidad estocástica* implica que, en promedio, el comportamiento del sistema es "contractivo", es decir, que si el estado inicial de la planta empieza suficientemente cerca del origen, la probabilidad de que el estado alcance un conjunto particular de restricciones, tiende a cero a medida que el tiempo se incrementa. No obstante, pueden existir realizaciones del sistema que no sean "contractivas", eso sí, con probabilidad pequeña.

Basado en la anterior discusión dado un modelo arbitrario, el cual puede ser un modelo en *lazo abierto*, o como se usará más adelante en *lazo cerrado* con un controlador preexistente)

$$x_{k+1} = A_{\theta(t)}x_k \tag{3}$$

y un conjunto de restricciones Ω_{max}, el objetivo de esta sección es la de calcular para el peor caso, la probabilidad de fallar en H o menos pasos. Se considera como fallos todas aquellas trayectorias del sistemas que para un horizonte igual o menos a H, sobrepasan al conjunto de restricciones Ω_{max}, empezando con unas condiciones iniciales perteneciente a $\Omega \subset \Omega_{max}$ (asumido *a priori*). El peor de los casos, es debido a que si una de las imágenes de cualquier vértice de Ω se sale del conjunto definido como restricciones, entonces ese modo de secuencia es considerado como fallo porque existe al menos un punto de Ω que puede llevar a fallo no recuperable.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

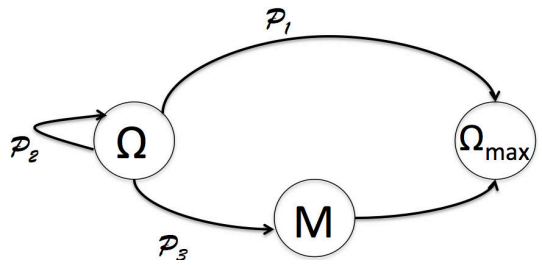


Figura 2: Diagrama de flujo del comportamiento del sistema para horizonte H.

Específicamente, dado un horizonte H, un conjunto de restricciones Ω_{max}, un conjunto central Ω, se propone un algoritmo para computar las siguientes probabilidades, ver Figura 2:

- **Probabilidad de Fallar ($\mathcal{P}_1$):** Probabilidad acumulativa para todas las secuencias de modos en la cual existe un vértice de Ω, tal que, una trayectoria desde este, abandona el interior del conjunto Ω_{max} en H o menos pasos.
- **Probabilidad de contracción ($\mathcal{P}_2$):** Probabilidad acumulada para todos aquellas secuencias de modos que no se salen del conjuntos Ω_{max} y la imagen de todos los vértices de Ω mapean dentro del mismo Ω, luego de exactamente H pasos.
- **Probabilidad de estado incierto ($\mathcal{P}_3$):** Se obtiene como 1 menos las otras dos probabilidades y, representa la probabilidad acumulativa de todas aquellas secuencias de modos para los cuales ninguna imagen de los vértices de Ω abandona el conjunto Ω_{max} en H o menos pasos, pero tampoco entran todos en el conjunto Ω, es decir, pertenecen al conjunto M de la Figura 2.

Ahora se procede a diseñar un algoritmo para calcular las probabilidades descritas anteriormente:

En el Algoritmo 1, la entrada *modelosini* es la lista de matrices del modelo (3), que como se discutió previamente, puede ser un modelo en lazo abierto o en lazo cerrado, junto con su probabilidad inicial asociada.

La función *Hijos*, dada una lista de (M: matriz, *prob*: probabilidad) genera, una nueva lista de (M: matriz, *prob*: probabilidad), multiplicando cada matriz de la lista de entrada por cada matriz de modo posible en (3), y la probabilidad asociada por la correspondiente probabilidad de modo desde el vector $\mathbb{P}$.

Por ejemplo, en la Figura 3, se puede observar que un sistema con dos modos de operación, tiene dos

Algoritmo 1 Análisis de confiabilidad para conjuntos politópicos

Entradas: Ω_{max}, Ω, $H, modelosini, \mathbb{P}$;

Salidas: $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \mathcal{P}_3$;

Pseudocódigo:

$\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_3 = 0$;
$\mathbb{V} = vertices(\Omega)$; $modelolist = modelosini$;

para $i = 0$ to H **hacer**
  $ListaHijos = Hijos(modelolist, \mathbb{P})$;
  $indice = 0$;
  para $j = 0$ to tamaño $(ListaHijos)$ **hacer**
    éxito=verdadero;
    para $k = 0$ to tamaño($\mathbb{V}$) **hacer**
      $Imagen = ListaHijos(j).M * \mathbb{V}(k)$;
      si not$(Imagen \in \Omega_{max})$ **entonces**
        $\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_1 + ListaHijos(j).prob$;
        éxito=falso; break;
      fin si
    fin para
    si (éxito) **entonces**
      $modelolist(indice) = ListaHijos(j)$;
      $indece = indece + 1$;
    fin si
  fin para
fin para
para $i = 0$ to tamaño($modelolist$) **hacer**
  éxito=verdadero;
  para $j = 0$ to tamaño($\mathbb{V}$) **hacer**
    $Imagen = modelolist(i).M * \mathbb{V}(j)$;
    si not $(Imagen \in \Omega)$ **entonces**
      éxito=falso; break;
    fin si
  fin para
  si (éxito) **entonces**
    $\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_2 + modelsit(i).prob$;
  fin si
fin para
$\mathcal{P}_3 = 1 - (\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2)$;

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

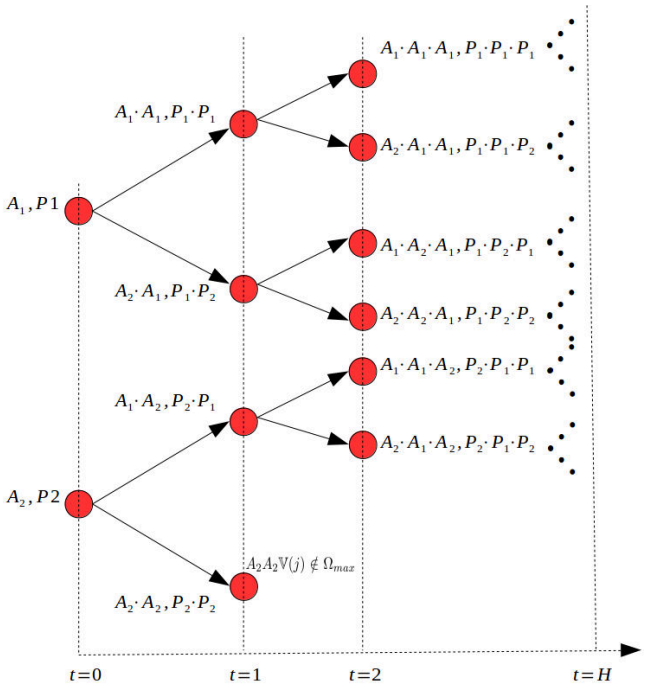


Figura 3: Posible árbol de trayectorias del estado (ejemplo).

hijos por cada una de las matrices consideradas en la iteración anterior. En $t = 1$ son obtenidos 4 hijos, dos de ellos desde A_1 y los otros dos desde A_2 en el paso $t = 0$. Una vez que *ListaHijos* es calculada, se procede a realizar la adecuada comprobación de los vértices en el algoritmo, dando como resultado que la imagen de algún vértice de la última secuencia abandona al conjunto de restricciones, esto es, $Imagen = A_2 A_2 \mathbb{V}(j) \notin \Omega_{max}$, por lo tanto, está secuencia no será considera para el siguiente instante $t = 2$. Luego, seis hijos aparecen en el siguiente instante y, así sucesivamente hasta que el final del horizonte H sea alcanzado.

Una vez obtenida cada una de las probabilidades de la mostradas en la Figura 2, se procede a calcular el tiempo medio entre fallos (MTBF) para condiciones iniciales $x_0 \in \Omega$.

3.2. Ecuación del MTBF

Para un funcionamiento confiable de un sistema, la probabilidad de fallar ($\mathcal{P}_1$) debe de ser pequeña, mientras que la probabilidad de contracción ($\mathcal{P}_2$) suficientemente alta. En un análisis del peor de los casos, todos los puntos de estados inciertos, que son aquellos que no abandonan al conjunto Ω_{max} pero tampoco entran en Ω, son considerados que eventualmente conducen al fracaso, que es por supuesto un enfoque conservador. Note que todas aquellas trayectorias que pertenezcan a Ω luego de exactamente H pasos, tendrán una probabilidad cada vez menor de fracasar.

Con las citadas probabilidades, se propone el siguiente estimado:

Teorema 1 *Para cualquier estado inicial $x_0 \in \Omega$, el tiempo medio entre fallos ($MTBF_\Omega$) de un sistema dado por la ecuación* (3)*, con un vector de probabilidades de modo $\mathbb{P}$, será mayor o igual al resultado obtenido desde la siguiente ecuación:*

$$MTBF_\Omega = \mathcal{P}_2 \cdot (H + MTBF_\Omega) + \mathcal{P}_1 \cdot 1 + \mathcal{P}_3 \cdot (H + 1) \tag{4}$$

Demostración: El termino $\mathcal{P}_1 \cdot 1$, computa el MTBF de todas aquellas trayectorias que abandonan el conjunto Ω_{max}, considerándose (peor caso) que lo hacen en $H = 1$, por lo tanto su MTBF es de 1. Por su parte, el termino $\mathcal{P}_3 \cdot (H + 1)$ calcula aquellas simulaciones que luego de exactamente H paso, pertenecen al conjunto M (ver Figura 2) y, se considera, como peor caso posible, que en el instante siguiente $(H + 1)$ van a fallar. La media de las tres posibles situaciones debe ser el MTBF si se comienza en Ω.

4. Ejemplo

Con el fin de evaluar el Algoritmo 1 propuesto, considere un sistema lineal correspondiente a doble integrador dado por:

$$G(s) = \frac{1}{s^2} \tag{5}$$

El período de muestreo es de T=0.05 s. El sistema está sujeto a las restricciones en los estados: $x_1 \in [-5, 5]$ y $x_2 \in [-7, 7]$, de modo que violarlas se supone es un fallo que obliga a detener el sistema de control.

Supondremos que la acción de control $u(k)$ se envía por una red a la planta cada período y que se recibe con retraso despreciable (si es que es recibida). Además se asume que el 90 % de las veces el envío se completa correctamente y, en un 10 % el paquete de datos con la acción de control se pierde. Por lo tanto, el sistema tiene dos modos de operación, el primero en el cual la acción de control se aplica al sistema (Modo 1) y, el segundo en donde dicha acción se pierde (Modo 2).

Luego de discretizar el sistema con periodo de muestreo de 0,05 segundo, la representación en espacio de estado es

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$x^1(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0{,}05 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(k) + \begin{pmatrix} 0{,}00125 \\ 0{,}05 \end{pmatrix} u(k)$$
$$x^2(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0{,}05 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(k) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(k) \quad (6)$$

donde, $x^1(k+1)$ y $x^2(k+1)$ representan el siguiente estado del sistema para el Modo 1 y Modo 2 respectivamente.

La ley de control aplicar al sistema corresponde a una realimentación del estado $u = -Fx(k)$ con la siguiente ganancia de realimentación

$$F = \begin{bmatrix} 8{,}999 & 5{,}7750 \end{bmatrix}$$

obtenida aplicando la bien conocida técnica de asignación de polos, forzando que dichos polos en lazos cerrado sean 0,85 en el caso nominal de recepción correcta de la acción de control.

En cuanto a la elección de los conjuntos necesarios para alimentar el Algoritmo 1, se partirá del conjunto inicial de restricciones en los estados (Ω_{max}, rojo en la figura 4). A partir de este se hace un zoom interno de 0,75 % para conseguir el conjunto Ω (ver Figura 4). Se asume que las condiciones iniciales estarán en dicho conjunto Ω (azul en la figura 4).

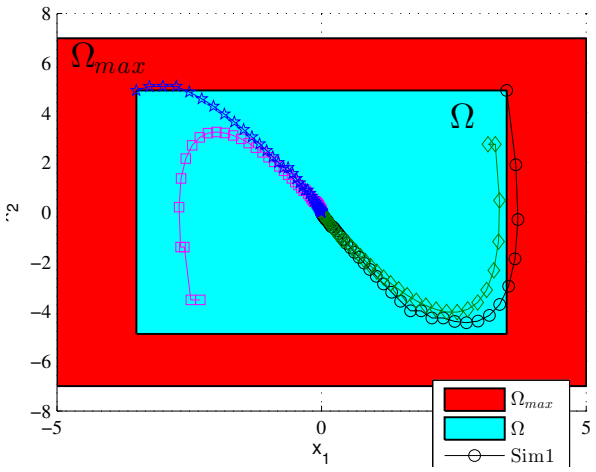


Figura 4: Plano de fase para los estados del sistema.

Una vez obtenidos los mencionados conjuntos, se utiliza el algoritmo 1 para calcular las probabilidades de fallar ($\mathcal{P}_1$), de contraer ($\mathcal{P}_2$) y la de los estados inciertos ($\mathcal{P}_3$). Con dichas probabilidad y aplicando la ecuación (4) se calcula el MTBF, para todos aquellos estados iniciales que pertenezcan al conjunto Ω. En la Tabla 1 se muestran los resultados para diferentes horizontes del Teorema 1.

Cuadro 1: Tiempo Medio para Fallar

Horizonte	**MTBF**
$H = 1$	2
$H = 2$	3
$H = 3$	4
$H = 4$	5
$H = 5$	18.9669
$H = 6$	46.0386
$H = 7$	182.3716
$H = 8$	526.7702
$H = 9$	1073.8324
$H = 10$	1402.9231
$H = 11$	1479.8284

En la Tabla 1 se puede observar que el MTBF para simulaciones con horizonte entre $H = 1$ y $H = 4$, es exactamente $H + 1$. La razón de esto es porque como se mencionó anteriormente, todas aquellas simulaciones que no salen del conjunto Ω_{max}, pero tampoco consiguen entrar al conjunto Ω, se consideran que fallaran en el instante siguiente. Esto puede observarse En la Figura 4 en donde la simulación etiquetada como *Sim1*, logra entra en el conjunto Ω a partir la quinta muestra, por lo tanto, toda simulación con un horizonte $H < 5$ Y partiendo desde la misma condición inicial, hará que el sistema permanezca entre ambos conjuntos (zona roja de la Figura 4).

Otro aspecto a resaltar de los resultados mostrados en la Tabla 1, es que a medida que aumenta el horizonte H, se incrementa también el MTBF.

A continuación se presenta los resultados de un simulación, en la cual el estado inicial corresponde al vértice $x_0 = [3{,}5 \quad 4{,}89]$ del conjunto Ω.

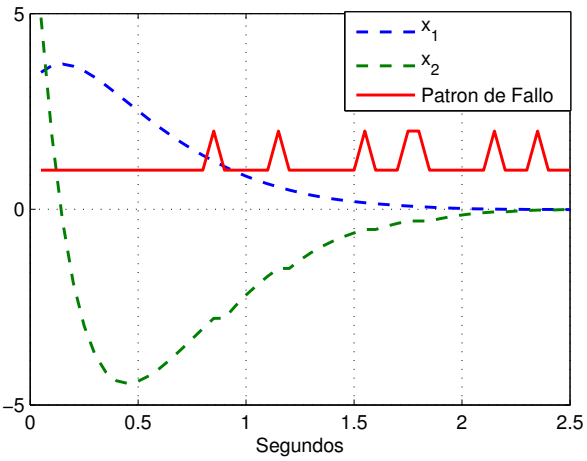


Figura 5: Linea Solida corresponde al patrón de fallo de la red WiFi. Linea discontinuas representan la posición y Velocidad del sistema

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Con el patrón esporádico de fallo, en efecto el sistema es estable. No obstante, según los resultados obtenidos, existen puntos en la frontera de Ω que fallarán con un MTBF de 1479 muestras (o mayor). Si este MTBF no se considera adecuado, puede prescribirse un conjunto inicial Ω más pequeño o recalcularse un mejor estimado con horizonte mayor, si se dispone de recursos computacionales suficientes.

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado un análisis de confiabilidad para sistemas lineales con fallos esporádicos y con modos inestables. Dichos fallos están asociados a un vector de probabilidad de ocurrencia. Se ha presentado un algoritmo para calcular las probabilidades de que las trayectorias del sistemas toquen un conjunto de restricciones Ω_{max}, o entren a un conjunto más pequeño Ω luego de un horizonte H prefijado. Una vez calculadas dichas probabilidades, se presenta un método para obtener el tiempo medio entre fallos para un conjunto de condiciones iniciales perteneciente al conjunto Ω.

Referencias

[1] Mogens Blanke and Jochen Schröder. *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer, 2006.

[2] Manuel A Hernández-Mejías, Antonio Sala, Carlos Ariño, and Andrés Querol. Fault-tolerant predictive control for markov linear systems. In *IEEE Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoka, Romania, 2014.

[3] Manuel A Hernández-Mejías, Antonio Sala, Carlos Ariño, and Andrés Querol. Reliable fault-tolerant predictive control for markov-jump linear systems. In *IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Antibes-Nice, France, 2014.

[4] James V Jones. *Integrated Logistics Support Handbook*. MacGraw-Hill Professional, 2006.

[5] Ron J Patton. Fault-tolerant control systems: The 1997 situation. In *IFAC symposium on fault detection supervision and safety for technical processes*, volume 3, pages 1033–1054, 1997.

[6] Vicenç Puig, Joseba Quevedo, Teresa Escobet, Bernardo Morcego, and Carlos Ocampo. Control tolerante a fallos (parte i): Fundamentos y diagnóstico de fallos. *RIAII*, 1(1):15–31, 2010.

[7] José Salt, V Casanova, A Cuenca, and R Pizá. Sistemas de control basados en red modelado y diseño de estructuras de control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(3):5–20, 2008.

[8] Wendy Torell and Victor Avelar. Mean time between failure: Explanation and standards. *American Power Conversion, White Paper*, 78, 2004.

[9] Wei Zhang, Michael S Branicky, and Stephen M Phillips. Stability of networked control systems. *Control Systems Magazine, IEEE*, 21(1):84–99, 2001.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL PREDICTIVO NO LINEAL DEL CONFORT TÉRMICO Y CALIDAD DE AIRE

M. Castilla[a], J.D. Álvarez[b], J.E. Normey-Rico[c], F. Rodríguez[a], M. Berenguel[a]
[a] Universidad de Almería-CIESOL-ceiA3. Dpto. Informática, Almería (España)
[b] Universidad de Sevilla. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Sevilla (España)
[c] Universidad Federal de Santa Catarina. Dpto. de Automatización y Sistemas, Florianópolis (Brasil)
email: mcastilla@ual.es, jalvarez19@us.es, julio@das.ufsc.br, frrodrig@ual.es, beren@ual.es

Resumen

Las condiciones de confort en entornos semicerrados tienen un efecto directo en la productividad de los usuarios y un efecto indirecto en el ahorro de energía. De esta forma, para mantener el confort térmico y la calidad de aire en un cierto entorno es necesario realizar una gestión adecuada de los elementos activos y pasivos del entorno, como por ejemplo, la ventilación forzada mediante el sistema de climatización y la ventilación natural a través de las ventanas. En este trabajo se presenta una arquitectura de control predictivo no lineal multivariable que permite, de forma simultánea, mantener el confort térmico y la calidad de aire mediante el uso de técnicas de ventilación natural y forzada. La efectividad de la estrategia de control propuesta se ha demostrado a través de ensayos reales en el interior de un edificio.

Palabras clave: Confort térmico, calidad de aire, control predictivo no lineal, control multivariable

1. Introducción

Según estudios recientes, el consumo de energía de los edificios representa aproximadamente el 40 % del consumo energético mundial, más de la mitad asociado con el uso de sistemas de climatización [2]. Además, los edificios son responsables de aproximadamente el 36 % de las emisiones mundiales de CO_2. Por este motivo, las instituciones gubernamentales están promoviendo la eficiencia energética en edificios por medio de varias directivas, como por ejemplo la 2010/31/EU [1]. Por consiguiente, la integración de energías renovables, la eficiencia energética y el uso adecuado de la energía en el interior de los edificios son temas que están siendo ampliamente analizados desde el punto de vista científico-técnico [9]. Por otro lado, al realizar las personas sus actividades diarias en el interior de los edificios [2], la eficiencia energética no debe comprometer su bienestar, siendo necesario alcanzar un compromiso entre ambos factores. Para satisfacer este objetivo, se pueden considerar distintas metodologías como la construcción de edificios bioclimáticos que incorporan estrategias pasivas y hacen uso de energías renovables. Sin embargo, en algunos casos, esta estrategia por sí misma puede ser insuficiente. Se hace por tanto necesario el uso de estrategias de control apropiadas con el principal objetivo de proporcionar ambientes confortables y, al mismo tiempo, incrementar el ahorro energético.

En general, desde el punto de vista de los usuarios un cierto entorno puede considerarse confortable si es capaz de proporcionar condiciones de confort térmico y de calidad de aire. El confort térmico se consigue regulando la temperatura del aire, mientras que la calidad de aire se suele controlar a través de la concentración de CO_2 [2]. Más concretamente, el control del confort térmico se realiza mediante el uso de sistemas de climatización. Para controlar la calidad de aire la técnica más usada es la ventilación, bien a través de los sistemas de climatización (ventilación forzada) o directamente por medio de ventilación natural. Sin embargo, cuando se produce un incremento o decremento en la ventilación de un cierto entorno el problema del control del confort térmico se ve afectado debido, principalmente, a los cambios en la temperatura del aire ocasionados por la ventilación. Por lo tanto, el problema del control del confort es un problema de control multivariable siendo necesario alcanzar un compromiso entre confort térmico y la calidad de aire.

En este trabajo se presenta una arquitectura de control jerárquica basada en una estrategia multivariable de control predictivo no lineal (PNMPC) propuesta por [10] y que hace uso de un modelo basado en primeros principios. Esta arquitectura de control es capaz de asegurar el confort térmico y la calidad de aire en un cierto entorno intentando reducir el consumo de energía mediante la optimización del uso de un sistema de climatización y una ventana. Esta estrategia ha sido

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

probada mediante ensayos reales en el interior de una habitación característica del edificio CIESOL (http://www.ciesol.es), aunque los resultados obtenidos pueden extrapolarse fácilmente a cualquier habitación de un edificio con una red de sensores y actuadores apropiada.

En la sección 2 se realiza una breve descripción de los conceptos de confort térmico y calidad de aire, así como la metodología necesaria para estimarlos. La sección 3 muestra la arquitectura de control propuesta. La sección 4 presenta los resultados reales obtenidos en una habitación característica del edificio CIESOL. Finalmente, en la sección 5 se realiza un resumen de las principales contribuciones y futuros trabajos.

2. Confort

2.1. Confort térmico

El confort térmico se puede definir como "*Esa condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico*" [8]. Más concretamente, la sensación de confort térmico de los usuarios es un proceso cognitivo que depende de varias circunstancias aparte de la temperatura del aire.

Aunque existen varios índices en la literatura para estimar las condiciones de confort térmico en un cierto entorno, el más extendido es el índice PMV (*Predicted Mean Vote*). Este índice es capaz de predecir la respuesta media sobre la sensación térmica de un grupo grande de personas expuesto a ciertas condiciones de confort durante un periodo de tiempo largo [8]. La formulación de este índice está basada en el balance de energía en el cuerpo humano, considerando éste como una única entidad, y puede ser calculado en función de este balance y de las siguientes seis variables: la actividad realizada por las personas (M), el aislamiento de la ropa (I_{cl}), la temperatura del aire (T_{air}), la temperatura media radiante (T_{mr}), la velocidad del aire (V_{in}) y la humedad relativa (H_r), tal y como se puede observar en (1).

$$PMV = [0{,}303 \exp(-0{,}036M) + 0{,}028] \cdot L \quad (1)$$

En la ecuación anterior, L representa la carga térmica en el cuerpo humano $[W/m^2]$ calculada como la diferencia entre la producción de calor interna y la perdida de calor que ocurre cuando la persona está en una situación de confort. Para más información sobre el proceso completo para estimar el índice PMV se recomienda al lector interesado el trabajo presentado en [6]. Los resultados proporcionados por este índice se distribuyen según una escala de sensación térmica de siete puntos: 0 neutralidad térmica, ±1 ligeramente caluroso/fresco, ±2 caluroso/frío, ±3 muy caluroso/frío. Para garantizar el confort térmico en un determinado entorno, los diferentes estándares recomiendan mantener este índice a 0 con una tolerancia de ±0,5 [8].

2.2. Calidad de aire

Hay un nuevo concepto en el marco de la utilización y construcción de edificios "*el síndrome del edificio enfermo*". Éste puede considerarse como un sinónimo de calidad de aire pobre, es decir, se puede definir como la posible aparición de problemas de salud y falta de confort para los usuarios [3]. Básicamente, los usuarios de un cierto entorno demandan dos cosas: percibir aire fresco en lugar de aire viciado, cargado o irritado, y saber que los riesgos para la salud que se pueden derivar de respirar ese aire son despreciables [6].

De acuerdo con los estándares internacionales [11], los niveles de calidad de aire se pueden clasificar en función de la concentración de CO_2 ya que es el principal producto resultante de la respiración humana. Más concretamente, la calidad de aire interior se puede clasificar en cuatro categorías: IDA-1 (calidad de aire alta), IDA-2 (calidad de aire media), IDA-3 (calidad de aire moderada) e IDA-4 (calidad de aire baja) [11].

En este trabajo se propone un nuevo índice para definir la calidad de aire: el índice IAQ (*Indoor Air Quality*). Este índice permite clasificar la calidad de aire en función de las cuatro categorías mencionadas anteriormente para habitaciones ocupadas donde no está permitido fumar y donde la principal fuente de polución es el metabolismo humano. Por lo tanto, el índice IAQ se puede calcular en función de la concentración de CO_2 interior y la clasificación proporcionada por el estándar internacional prEn-13779 [11] según (2). Para ello, se ha considerado un nivel óptimo de concentración de CO_2 por debajo de 500 *ppm*, y por consiguiente, el índice IAQ es igual a 0. Posteriormente, para un nivel de concentración de CO_2 mayor, el índice IAQ incrementa su valor siguiendo una regresión lineal, véase (2).

$$IAQ = 0{,}001 \cdot CO_{2_{in}} - 0{,}5 \quad (2)$$

Los resultados proporcionados por este índice se organizan en una escala de cuatro puntos: 0 para una calidad de aire alta (IDA-1), de 0 a 0,1 para una calidad de aire media (IDA-2), de 0,1 a 0,5 para una calidad de aire moderada (IDA-3), y de 0,5 a 1 para una calidad de aire baja. Para garantizar la calidad de aire en un cierto entorno es recomendable mantener el nivel de concentración de CO_2 entre 500 *ppm* y 600 *ppm* [4], es decir, un índice IAQ igual a 0 con una tolerancia del 0,1.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3. Arquitectura de control

Tras un detallado estudio de los resultados proporcionados por varios análisis de confort realizados en el interior del edificio CIESOL se llegó a la conclusión de que era necesario desarrollar un sistema de control específico, capaz de mantener las condiciones climáticas dentro de una zona de confort específica minimizando, al mismo tiempo, el consumo de energía [5].

En este trabajo se implementa un sistema de control jerárquico para regular el confort de los usuarios, véase figura 1. Este sistema de control está basado en el algoritmo PNMPC presentado en [10] y en un modelo no lineal del clima interior basado en primeros principios [7]. Por lo tanto, el principal objetivo de control consiste en mantener el confort térmico y la calidad de aire dentro de una zona de confort definida por los índices PMV e IAQ minimizando, al mismo tiempo, el consumo de energía necesario para alcanzar dichas condiciones de confort. Para ello, se ha considerado que hay dos actuadores disponibles: el sistema de climatización basado en frío solar (ventilación forzada), y la ventilación natural a través de la ventana.

La arquitectura de control propuesta consiste en un esquema clásico de control jerárquico con un optimizador en la capa superior, la cual por medio del algoritmo PNMPC [10] proporciona referencias óptimas de temperatura de impulso del fan-coil, T_{imp}, y de apertura de la ventana, Ap_{vnt}. Al mismo tiempo, estas referencias, T_{imp} y Ap_{vnt}, influencian en la temperatura del aire y en la concentración de CO_2 permitiendo alcanzar una situación óptima de confort en función de los otros parámetros climáticos. Es importante mencionar que existe una capa inferior para el control del fan-coil, mientras que en el caso de la ventana el algoritmo PNMPC envía directamente la señal de control, la apertura de la ventana Ap_{vnt}, ya que este actuador se encuentra en bucle abierto al no existir un sensor que permita medir su apertura. Finalmente, la capa inferior, permite que el sistema de climatización pueda alcanzar las referencias de temperatura de impulso de forma eficiente regulándolo mediante la velocidad del fan-coil y la cantidad de agua que circula a través de él.

Para probar la arquitectura de control propuesta en el interior de una habitación característica del edificio CIESOL fue necesario caracterizar su comportamiento dinámico mediante el desarrollo de un modelo basado en primeros principios. Debido principalmente a la falta de espacio dicho modelo no se ha incluido en este trabajo, pero su desarrollo completo se puede encontrar en [7].

3.1. Capa de optimización: Estrategia de control predictivo no lineal

Como se mencionó anteriormente, este trabajo propone una arquitectura de control jerárquica para el control del confort térmico y de la calidad de aire en el interior de un cierto entorno. Más concretamente, se trata de una arquitectura jerárquica de dos capas, véase figura 1. La capa de optimización es la responsable de generar consignas apropiadas de temperatura de impulso del fan-coil (T_{imp}) y de apertura de la ventana (Ap_{vnt}) para alcanzar condiciones de confort óptimas, es decir, unos valores para los índices PMV e IAQ igual a cero. Para ello, se ha usado la estrategia PNMPC desarrollada en [10]. Asimismo, la temperatura de impulso del fan-coil se puede controlar mediante los dos grados de libertad proporcionados por el fan-coil: la velocidad del fan-coil (V_{Fan}), y la cantidad de agua que circula a través de él que a su vez se regula mediante el grado de la apertura de la válvula del fan-coil (Ap_{valv}). Por este motivo, en la capa inferior se ha desarrollado un PI con anti-windup combinado con un controlador de gama partida.

En general, los algoritmos MPC se caracterizan por el uso de un vector de salidas predichas, $\hat{\mathbf{y}}$, a lo largo de un horizonte de control, N, en función de un vector que contiene futuros cambios en la acción de control, $\mathbf{\Delta u}$. En este caso, $\hat{\mathbf{y}}$ se calcula en función del modelo basado en primeros principios [7] y aunque continua siendo únicamente una aproximación, este modelo representa mejor el comportamiento del sistema que un simple modelo lineal. Por lo tanto, la formulación del problema MPC para el sistema multivariable viene dada por:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{f} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{\Delta u} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{\mathbf{y}}_\mathbf{1}; \hat{\mathbf{y}}_\mathbf{2}] \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{f}} = [\mathbf{f_1}; \mathbf{f_2}] \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{1,1} & \mathbf{G}_{1,2} \\ \mathbf{G}_{2,1} & \mathbf{G}_{2,2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{\Delta u} = [\mathbf{\Delta u_1}; \mathbf{\Delta u_2}] \quad (7)$$

donde tanto las matrices de respuesta libre, $\mathbf{f}_i$, y de respuesta forzada, $\mathbf{G}_{i,j}$ se calculan mediante el algoritmo propuesto en [10]. Esta estrategia difiere de las técnicas clásicas de control predictivo no lineal en que hace uso de modelos lineales en cada instante de tiempo los cuales son independientes de los puntos de operación del sistema para calcular la matriz $\mathbf{G}_{i,j}$. Por otro lado, la respuesta libre del sistema $\mathbf{f}_i$ se calcula igualando las acciones de control a cero y asumiendo que no se produce ningún cambio a lo largo del horizonte de predicción. Por lo tanto, en esta estrategia el vector de salidas predichas, $\hat{\mathbf{y}}$, se calcula como se puede observar en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

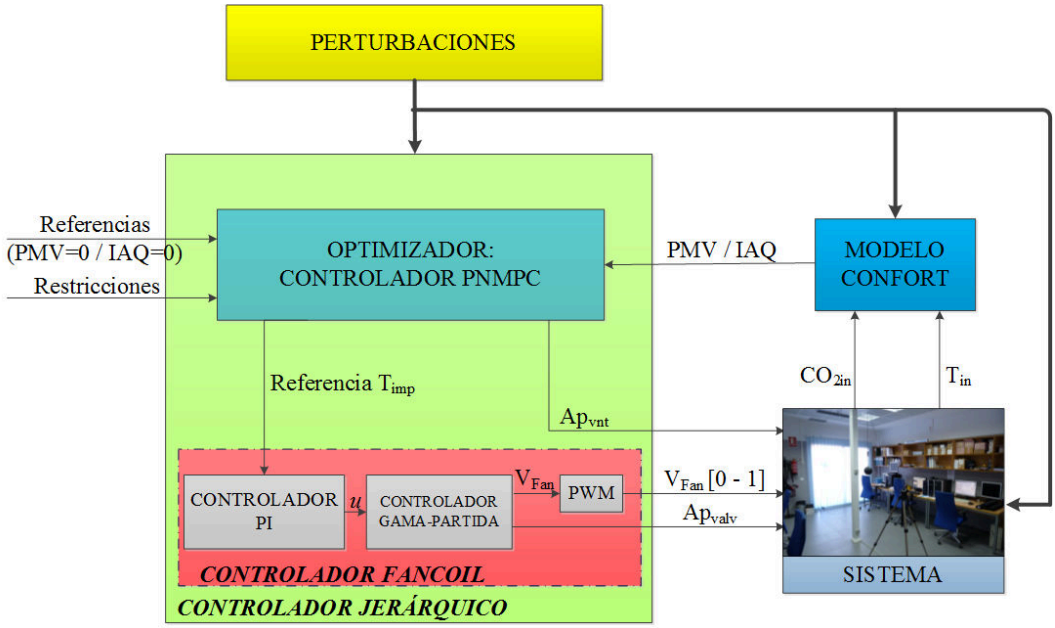


Figura 1: Arquitectura de control

(8)-(10):

$$\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{y}}_1\\ \hat{\mathbf{y}}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{f}_1\\ \mathbf{f}_2\end{bmatrix} + \mathbf{G}_{PNMPC}\begin{bmatrix}\mathbf{\Delta u}_1\\ \mathbf{\Delta u}_2\end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_i = f\left(\mathbf{y}_{i_p}, \Delta u_{j_p}, \Delta v_p\right) \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_{PNMPC} = \begin{bmatrix}\frac{\partial \hat{\mathbf{y}}_1}{\partial \mathbf{\Delta u_1}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}_1}{\partial \mathbf{\Delta u_2}}\\ \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}_2}{\partial \mathbf{\Delta u_1}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}_2}{\partial \mathbf{\Delta u_2}}\end{bmatrix} \quad (10)$$

En las ecuaciones anteriores, Δu_{j_p} representan los incrementos pasados en la acción de control j, Δv_p son los incrementos pasados en las perturbaciones medibles, $\mathbf{y}_{i_p}$ son los valores pasados y presentes de la salida del sistema i, y la matriz $\mathbf{G}_{PNMPC}$ representa el jacobiano de $\hat{\mathbf{y}}$. Para calcular en cada periodo de muestreo $\mathbf{f}_i$ y $\mathbf{G}_{i,j}$ para cada conjunto salida-variable manipulada se usa el algoritmo propuesto por [10]. Finalmente, la ley de control se obtiene usando técnicas similares a las que se usan con otros algoritmos clásicos de MPC.

3.1.1. Función de coste

En el caso de estudio presentado en este trabajo se hace uso de la función de coste definida por (11). Esta función de coste intenta calcular el mejor conjunto de señales de control, $\mathbf{\Delta u}$, que es capaz de minimizar el error de seguimiento, el cual se puede definir como la diferencia entre las futuras salidas predichas ($\hat{\mathbf{y}}$), los índices PMV e IAQ, y los valores de referencia para dichos índices ($\mathbf{w}$), que en ambos casos es igual a 0. Además, los cambios en las señales futuras de control (T_{imp} y Ap_{vnt}) se penalizan a través de sus correspondientes factores de peso.

$$J = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{N}\delta_i[\hat{y}_i(k+j|k) - w_i(k+j)]^2 + \sum_{c=1}^{2}\sum_{j=1}^{N_u}\lambda_c[\Delta u_c(k+j-1)]^2 \quad (11)$$

donde, en este caso, $\hat{y}_i(k+j|k)$ es la predicción de los índices PMV e IAQ, $\hat{y}_1$ y $\hat{y}_2$ respectivamente, y $\Delta u(k+t-1)$ representa el cambio futuro en la señal de control en la cual u_1 es la temperatura de impulso del fan-coil (T_{imp}), y u_2 es la apertura de la ventana (Ap_{vnt}).

3.1.2. Restricciones

Asimismo, el problema de optimización está sujeto a varias restricciones definidas por las ecuaciones (12) y (13). La primera restricción, (12), limita el cambio mínimo y máximo de la señal de control en cada instante de tiempo mientras que la segunda restricción, (13), hace referencia a las restricciones físicas del fan-coil y de la ventana, es decir, tiene en cuenta la temperatura de impulso y la apertura de la ventana mínima y máxima, $[u_{c_{min}}, u_{c_{max}}]$, que se pueden alcanzar con los actuadores actuales.

$$\begin{bmatrix}\Delta\mathbf{u}_{1_{min}}\\ \Delta\mathbf{u}_{2_{min}}\end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix}\Delta\mathbf{u}_1(k+j-1)\\ \Delta\mathbf{u}_2(k+j-1)\end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix}\Delta\mathbf{u}_{1_{max}}\\ \Delta\mathbf{u}_{2_{max}}\end{bmatrix} \quad (12)$$
$$\forall j = 1, \ldots, N_u$$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{u}_{1_{min}}\\ \mathbf{u}_{2_{min}}\end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix}\mathbf{u}_1(k+j-1)\\ \mathbf{u}_2(k+j-1)\end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix}\mathbf{u}_{1_{max}}\\ \mathbf{u}_{2_{max}}\end{bmatrix} \quad (13)$$
$$\forall j = 1, \ldots, N_u$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.2. Capa de control: Controlador MISO para el fan-coil

La capa de control recibe como entrada la consigna de temperatura de impulso del fan-coil, T_{imp}, calculada por el optimizador e incluye un algoritmo de control que intenta alcanzar dicha referencia de forma eficiente. Más concretamente, el fan-coil instalado en el edificio CIESOL permite controlar la temperatura de impulso, T_{imp}, mediante la velocidad del fan-coil, V_{Fan} y la regulación del flujo de agua a través de él que se controlar por medio de una válvula, Ap_{valv}. Por lo tanto, el fan-coil se puede clasificar como un sistema MISO (multiples entradas y una única salida) donde las entradas de control son la apertura de la válvula y la velocidad del fan-coil, y la salida del sistema es la temperatura de impulso. Por lo tanto, es necesario desarrollar un controlador capaz de alcanzar la consigna de temperatura de impulso proporcionada por el algoritmo PNMPC. Para ello, se ha desarrollado un controlador PI discreto con anti-reset windup combinado con una controlador de gama partida.

3.2.1. PI con función anti-reset windup

Este controlador recibe como entrada la consigna de temperatura de impulso estimada por el algoritmo PNMPC. Consiste en un controlador PI discreto con un tiempo de muestreo $t_s = 8s$, el cual se ha diseñado para obtener dicha temperatura de impulso en función de una señal de control global, u comprendida entre 0 % y 100 %. Para sintonizar los parámetros del controlador PI, se ha obtenido mediante ensayos reales una función de primer orden que relaciona los cambios en la temperatura de impulso con el efecto combinado de la velocidad del fan-coil y el flujo de agua a través de él.

Así, la función de transferencia que representa la relación entre la temperatura de impulso, T_{imp}, y la señal de control global u es $P(s) = k/(\tau_{ba}s + 1)$ dónde $k = 0{,}085^{o}\mathrm{C}/\,\%$ y $\tau_{ba} = 40s$. Por tanto, en base a la función de transferencia anterior, el controlador PI se puede definir como $C(s) = k_c(1 + sT_i)/sT_i$ con una constante de tiempo en bucle cerrado, τ_{bc}, dos veces más grande que la de bucle abierto, τ_{ba}. De esta forma, los parámetros del PI deben ser $k_c = 0{,}5/k$ and $Ti = \tau_{ba}$. Además, para evitar efectos indeseables derivados de la saturación del actuador se ha añadido una función anti-reset windup definida por una constante de tiempo de seguimiento $\tau_t = \sqrt{\tau}$. Finalmente, a partir de la señal de control global, u, calculada por el controlador PI, las señales de control asociadas con la velocidad del fan-coil, V_{Fan} y la apertura de la válvula Ap_{valv} se obtienen mediante el controlador de gama partida. Nótese qe se ha utilizado como señal directa de control la apertura de la válvula de impulsión, que es una buena opción cuando no hay perturbaciones en el caudal de impulsión. El sistema se puede modificar incluyendo un caudalímetro de forma que se implemente un control en cascada de forma que el controlador PI determine el caudal de impulsión demandado y el lazo esclavo calcule la apertura necesaria de la válvula Ap_{valv} para alcanzar dicho caudal. En los ensayos mostrados en este trabajo se ha utilizado directamente Ap_{valv} porque no había demandas adicionales de otras habitaciones y el caudal de impulsión no ha sufrido fluctuaciones.

3.2.2. Controlador de gama partida

Este controlador se ha utilizado para establecer una relación fija entre la señal de control global, u, proporcionada por el controlador PI y las variables manipuladas del fan-coil: la apertura de la válvula, Ap_{valv} y la velocidad del fan-coil, V_{Fan}. Esta relación se calcula en función de la influencia combinada de cada variable manipulada en la temperatura de impulso, y también, teniendo en cuenta el consumo de energía derivado del uso de cada una de ellas. Por tanto, después de un estudio detallado del consumo de energía asociado con cada variable, se ha llegado a la conclusión de que el uso de la velocidad del fan-coil es más eficiente, en términos energéticos, que el uso de la válvula que regula el flujo de agua ya que en el primer caso sólo se tiene que considerar el motor del ventilador, mientras que en el otro caso, también se tiene que tener en cuenta el consumo de energía derivado de la instalación de frío solar (bombas y la caldera). Por tanto, para desarrollar un controlador eficiente, primero se debe intentar alcanzar la temperatura de impulso mediante el uso de la velocidad del fan-coil, y sólo cuando no es posible alcanzarla con esa variable, combinar la velocidad del fan-coil con la válvula que regula el flujo de agua. En particular, el controlador de gama partida se ha definido en base al comportamiento que se puede observar en la figura 2. Como se puede observar en dicha figura el punto en el que la válvula comienza a trabajar esta asociado con una señal de control global proporcionada por el controlador PI, u, mayor del 36,6 %.

De acuerdo con la función de gama partida definida por la figura 2, en cada instante de muestreo el controlador de gama partida proporciona un valor para la velocidad del fan-coil V_{Fan} comprendido en el rango $[0, 100\,\%]$. Sin embargo, normalmente los fan-coil industriales se encuentran implementados mediante acciones discretas todo/nada. Por lo tanto es necesario transformar la velocidad del fan-coil de tal forma que las acciones de control se puedan proporcionar por medio de un actuador

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

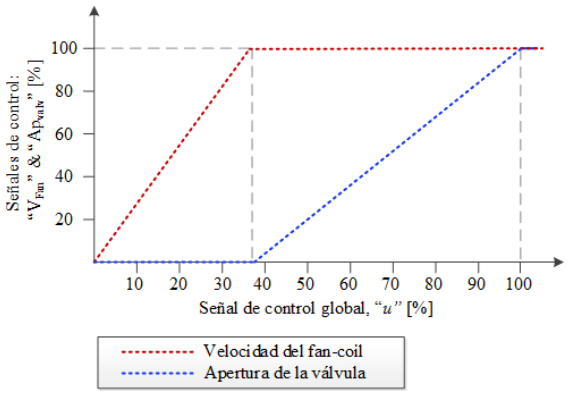


Figura 2: Control de gama partida para el periodo de verano

discreto. La forma en la que se ha solucionado esto ha sido por medio de una señal PWM (Pulse Width Modulation). Además, para evitar el estrés en el fan-coil, éste no se conectará hasta la que señal de control asociada con la velocidad del fan-coil sea mayor que 35 % lo cual es equivalente a una señal de control global igual a 15 %, véase figura 2.

4. Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados reales obtenidos al probar la estrategia de control propuesta en este trabajo en una habitación característica del edificio CIESOL durante el periodo de verano. Más concretamente, el ensayo que se muestra tiene una duración de aproximadamente cinco horas y media, desde las 9:30 hasta las 15:00 aproximadamente. Este ensayo se realizó con un periodo de muestreo de 240 s en la capa superior, el PNMPC. Asimismo, el tiempo de muestreo de la capa inferior para el control del confort, el controlador MISO, es igual a $8s$. Respecto a los otros parámetros del controlador, los horizontes de predicción y control son iguales para ambas variables de salida y para ambas variables de control, es decir, $N = 15$ para los índices PMV e IAQ, y $N_u = 5$ para la temperatura de impulso, T_{imp} y la apertura de la ventana Ap_{vnt}. Sin embargo, el peso asociado con el seguimiento de consignas es diferente para cada variable δ_1 es igual a 15 para el confort térmico y δ_2 es igual a 10 para la calidad de aire interior. Los pesos asociados por las señales de control son $\lambda_1 = 0{,}19$ y $\lambda_2 = 0{,}1$ para T_{imp} y Ap_{vnt} respectivamente. Los valores seleccionados para los pesos se han elegido para normalizar los objetivos de optimización que aparecen en (11).

Finalmente, la estrategia de control propuesta está sujeta a las restricciones definidas por (12) con $\Delta u_{1_{min}} = -5$°C, $\Delta u_{1_{max}} = 5$°C, $\Delta u_{2_{min}} = -10\,\%$ y $\Delta u_{2_{max}} = 10\,\%$ y por (13) donde $u_{1_{min}} =$ 17,5°C, $u_{1_{max}} = 27$°C, $u_{2_{min}} = 0\,\%$ y $u_{2_{max}} = 10\,\%$. Estos límites se han determinado mediante varios ensayos realizados con el fan-coil para establecer sus límites físicos. En este punto es importante destacar que el límite superior para la apertura de la ventana es $u_{2_{max}} = 10\,\%$, es decir, la ventana nunca está totalmente abierta. Es razonable que una apertura de ventana más grande reducirá la concentración de CO_2 más rápido pero también afectará más al confort térmico. Por lo tanto, es necesario elegir una apertura de ventana que busque un compromiso entre esos dos factores, la velocidad a la cual se reduce la concentración de CO_2 y el deterioro del confort térmico. Tras varias simulaciones, los valores seleccionados parecen apropiados para ambos propósitos de control.

Con el controlador anteriormente descrito los resultados reales obtenidos se pueden observar en las figuras 3-5 y se organizan como siguen:

- Las figuras 3 y 4 muestran la evolución de los índices de confort y las señales de control proporcionadas a los distintos actuadores para alcanzar una situación de confort óptima. Más concretamente, las gráficas de la figura 3 muestran, respectivamente, la evolución de los índices PMV e IAQ. Asimismo, en la primera gráfica de la figura 4 se pueden observar la señal de control global, u, calculada mediante el controlador PI, y las señales de control asociadas con la velocidad del fan-coil, V_{Fan}, y la apertura de la válvula, Ap_{valv} estimadas por el controlador de gama partida. En la segunda gráfica de esta figura se muestra la señal PWM para la velocidad del fan-coil. Finalmente, en la última gráfica de la figura 4, se puede observar la apertura de la ventana, Ap_{vnt}.
- La figura 5 muestra la evolución dinámica de las principales variables que influencian el confort de los usuarios. Se puede dividir en cuatro partes: la primera gráfica muestra la temperatura de impulso del fan-coil proporcionada por el optimizador PNMPC y su valor real medido en la habitación T_{imp}. En la segunda gráfica se pueden observar las temperaturas del aire interior y exterior, T_{in} y T_{out}. La tercera gráfica muestra la evolución de la concentración de CO_2 en el interior y en el falso techo de la habitación seleccionada, $CO_{2_{in}}$ y $CO_{2_{ft}}$. Finalmente, en la cuarta gráfica se puede observar el número de personas en el interior de la habitación, N_p.

Como se puede observar en la primera y la segunda gráfica de la figura 3, la estrategia propuesta permite mantener los índices PMV e IAQ dentro

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

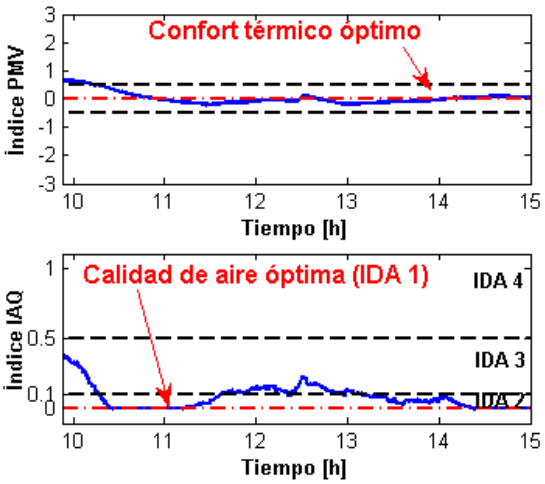


Figura 3: Resultados reales obtenidos en el edificio CIESOL. Índices de confort

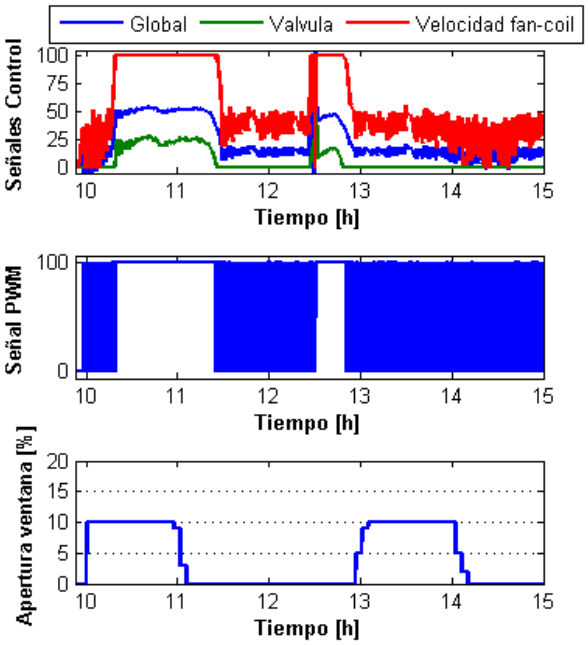


Figura 4: Resultados reales obtenidos en el edificio CIESOL. Señales de control

de una zona de confort aceptable ya que los mismos son casi igual a cero a lo largo de todo el ensayo. Además, en primera instancia, la estrategia de control PNMPC intenta controlar el confort térmico y la calidad de aire por medio de ventilación natural, ver primera y tercera gráfica de la figura 4, ya que tanto la concentración de CO_2 como la temperatura del aire exterior son más bajas que los medidos en el interior de la habitación. Posteriormente, como no es posible alcanzar las condiciones de confort usando solo la ventilación natural el sistema de climatización también se usa. Además, de acuerdo con las restricciones de eficiencia energética definidas mediante el controlador de gama partida, la velocidad del fan-coil crece más rápido que el flujo de agua a través de él, véase primera gráfica de la figura 4. Después de eso, alrededor de las 11 *a.m.*, tanto el índice PMV como el IAQ son casi iguales a cero y el sistema de control decide cerrar la ventana en vez de apagar el sistema de climatización, lo cual es más eficiente en términos energéticos, ya que la temperatura exterior es prácticamente igual a la temperatura interior, véase la segunda gráfica en la figura 5. Desde este instante hasta las 12:30 aproximadamente, el sistema trata de controlar ambos objetivos por medio del fancoil. Sin embargo, sobre las 12:30 se puede observar que el índice IAQ se encuentra fuera de la zona de confort definida para él, es decir, se encuentra dentro de la zona IDA-3 que se corresponde con una calidad de aire moderada. Por lo tanto, para corregir esta situación, primero intenta reducir la concentración CO_2 incrementando la velocidad del fan-coil, ya que la temperatura del aire exterior es mayor que la temperatura del aire interior. Sin embargo, como no es posible disminuir la concentración de CO_2 mediante la ventilación forzada, desde las 13:00 el sistema de control hace uso de la ventilación natural para mejorar la calidad de aire interior y apaga el sistema de climatización sacrificando un poco la situación de confort térmico.

5. Conclusiones y futuros trabajos

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran como la estrategia de control multivariable no lineal es capaz de mantener el confort térmico y la calidad de aire y, al mismo tiempo, optimizar el uso de ventilación forzada y natural. Sin embargo, a pesar de que los resultados obtenidos son buenos es necesario realizar un estudio más detallado para alcanzar un compromiso entre los objetivos establecidos, en este caso confort térmico y calidad de aire interior ya que estos están directamente interconectados. Como trabajo futuro, se aplicarán técnicas de control multiobjetivo para intentar resolver este problema buscando por una mejor solución de compromiso entre ambos índices. De esta forma, se podría operar con la ventana a lo largo de todo su rango. Asimismo, esta arquitectura de control se integrará en otro tipo de entornos, como por ejemplo en invernaderos.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren agradecer al Gobierno de Andalucía (Consejería de Economía, Innovación y Ciencia) por financiar este trabajo a través del programa “Formación de personal docente e investigador predoctoral en las Universi-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

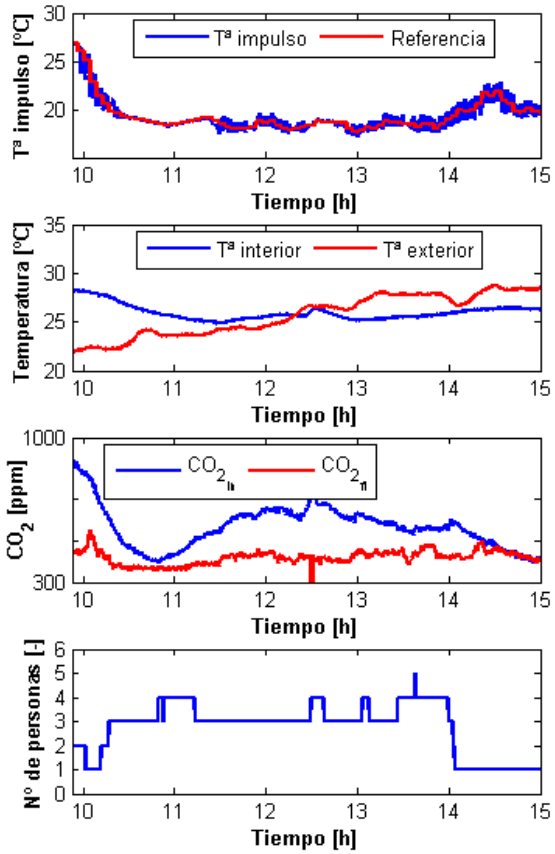


Figura 5: Gráfica superior: temperatura de impulso y su referencia. Segundo gráfica: temperatura interior y exterior. Tercera gráfica: concentración de CO_2 interior y exterior. Gráfica inferior: Número de personas

dades Andaluzas, en áreas de conocimiento deficitarias por necesidades docentes (FPDU 2009)" y del proyecto de excelencia CONTROLCROP PIOTEP-6174. José Domingo Álvarez es un miembro del programa "Juan de la Cierva". Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto DPI2011-27818-C02-01/02, PSE-ARFRISOL PS-120000-2005-1, DPI2010-21589-C05-04 (Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER) y PHB2009-0008 (financiado por el ministerio español de Educación; CNPq-BRASIL; CAPES-DGU 220/2010).

Referencias

[1] 2010/31/UE. Directive 2010/31/UE of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Disponible en linea en: `http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF`. último accesso 24 Julio 2013. 2010.

[2] S. Atthajariyakul y T. Leephakpreeda. Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage. *Energy and Buildings*, 36:720–733, 2004.

[3] H. B. Awbi. *Ventilation of Buildings*. Spon Press, 2003.

[4] M. J. Berenguer y F. Bernal. NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad de aire interior. Inf. téc., INSHT. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1994.

[5] M. Castilla, J. D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, J. L. Guzmán y F. Rodríguez. Análisis de confort térmico y consignas para control en el edificio bioclimático ARFRISOL del CIESOL en la Universidad de Almería. En *XXX Jornadas de Automática, Valladolid*. 2009.

[6] M. Castilla, J. D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, F. Rodríguez y J. L. Guzmán. Técnicas de control del confort en edificios. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(3):5–24, julio 2010.

[7] M. Castilla, J.D. Álvarez, F. Rodríguez y M. Berenguel. *Comfort control in buildings*. Springer. Advances series in Industrial Control, 2014. ISBN 978-1-4471-6346-6.

[8] ISO7730. *Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. International Organisation for Standardisation, 1994.

[9] D. Kolokotsa, D. Tsiavos, G. S. Stavrakakis, K. Kalaitzakis y E. Antonidakis. Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupant thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings*, 33:531–543, 2001.

[10] A. Plucenio, D. J. Pagano, A. H. Bruciapaglia y J. E. Normey-Rico. A practical approach to predictive control for nonlinear processes. En *7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, NOLCOS, Pretoria, South Africa*. 2007.

[11] prEN 13779. *Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. European Committee for Standardization, 2007.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño de circuitos genéticos en Biología Sintética utilizando optimización multi-objetivo

Yadira Boada, Alejandra González, Alejandro Vignoni, Gilberto Reynoso-Meza, Jesús Picó
{yaboa, algonbos, alvig2, gilreyme, jpico}@upv.es
Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Resumen

Se conoce como adaptación a la habilidad de los circuitos genéticos para responder a un cambio de su entrada y retornar al valor que se tenía previo al estímulo, aún cuando el cambio de la entrada persista. Uno de los objetivos de la Biología Sintética es diseñar circuitos genéticos utilizando criterios de ingeniería para buscar una solución que cumpla con las especificaciones de diseño. Algunos de estos requisitos son excluyentes entre sí, y la optimización de uno conduce al empeoramiento de otro, y se convierte en un problema de optimización multi-objetivo. En este trabajo proponemos un modelo reducido de un circuito genético de 3 nodos, diseñado utilizando técnicas de separación de escala temporal e invarianza de sistemas, y utilizando optimización multi-objetivo obtenemos un frente de Pareto para los parámetros de este modelo que provean al circuito la característica deseada: adaptación. Los resultados muestran que el marco utilizado es acertado para los fines propuestos, proporcionando nuevas herramientas para el diseño sistemático de circuitos genéticos con respuestas preestablecidas.

Palabras clave: expresión genética, adaptación, optimización multi-objetivo, sistemas biológicos, modelos reducidos.

1. Introducción

Un área que ha ganado especial relevancia en los últimos años dentro de la Biología Sintética es el diseño sistemático de circuitos sintéticos genéticos [7]. El modelado y simulación de estas redes incluyen metodologías y criterios de diseño de ingeniería y control de sistemas dinámicos. El problema de diseño de circuitos genéticos a partir de modelos, involucra la búsqueda de una solución óptima entre los diferentes requerimientos y necesidades de este circuito. Por ejemplo, entre los requisitos más comunes podemos encontrar su topología, valores de sus parámetros, relación entrada-salida y clases de comportamientos como la capacidad de adaptación. Este último caso en particular, se conoce como la habilidad de los circuitos genéticos para responder ante un cambio de su entrada y regresar al valor que se tenía previo al estímulo, aún cuando el cambio de la entrada persista. La adaptación es una propiedad importante de los sistemas biológicos que está ligada directamente con la homeostasis [1].

Para medir la capacidad de adaptación se pueden utilizar diversos índices de medida. dos índices adecuados son el grado de cambio de la salida frente a una entrada, y el error de salida en régimen permanente respecto al valor inicial. Con estos dos índices se puede establecer una escala de comportamiento adaptativo [12]. La existencia de múltiples índices a optimizar puede llevar a la necesidad de alcanzar soluciones de compromiso cuando la mejora de uno de ellos, conduce al empeoramiento en otros. Esto es lo que sucede con los dos índices utilizados en este trabajo. Para hacer frente a esta situación, se ha utilizado un software de optimización multi-objetivo (MOO) a efectos de obtener el frente de Pareto [9].

Este trabajo integra los principios anteriores para construir un modelo de circuito sintético genético de 3 nodos que tenga la característica de adaptación. En la sección 2 se modela la expresión genética de este circuito, en la sección 3 aplicamos la MOO al modelo anterior para obtener parámetros que generen adaptación, y finalmente en la sección 4 discutimos los resultados y presentamos algunas conclusiones.

2. Modelado de la expresión genética en células procariotas

El ADN (ácido desoxi-rribonucléico) presente dentro de la célula puede subdividirse en segmentos de información llamados genes que contienen instrucciones codificadas para la producción de una proteína específica, necesaria para el desarrollo y funcionamiento de dicha célula. El Dogma Central de la Biología Molecular [5] establece que para obtener una proteína (por ejemplo una cadena de aminoácidos), las células ejecutan un proceso en dos etapas conocido como expresión genética: *i)* transcripción y *ii)* traducción (ver Figura 1). La transcripción es el proceso de obtención del ARN mensajero (ARNm) a partir del ADN correspon-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

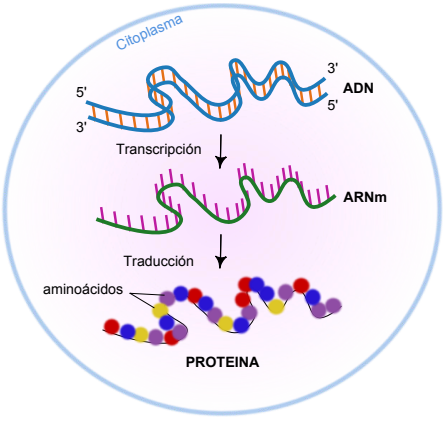


Figura 1: Dogma central de la Biología Molecular con las 2 etapas de Transcripción y Traducción para la obtención de una proteína.

diente a un gen. Esta copia la realiza la enzima ARN polimerasa (ARNp) a partir de la secuencia de ADN (Adenina, Guanina, Citosina y Timina) que es transformada en ARNm y donde el Uracilo reemplaza a la Timina. La transcripción inicia cuando la ARNp se une a una región del ADN conocida como promotor, y junto a otros compuestos denominados factores de transcripción habilitan o impiden el inicio de la transcripción. De esta forma se transfiere el ARNm a los ribosomas que son los responsables de la traducción, fase en la que se genera la proteína.

2.1. Reacciones y ecuaciones mediante balance de masa

El Dogma central puede sintetizarse en reacciones bioquímicas de las especies intervinientes: gen, ARNm y proteína. Si la expresión genética es *constitutiva* no se requiere factor de transcripción alguno para iniciar la expresión.

$$\text{Gen} \xrightarrow{k_1} \underset{\substack{d_1\downarrow \\ \emptyset}}{\text{ARNm}} \xrightarrow{k_2} \underset{\substack{d_2\downarrow \\ \emptyset}}{\text{Proteína}}$$

Utilizando la ley de acción de masas [1], las reacciones anteriores resultan en las ecuaciones (1-2) donde m y p son las concentraciones de ARNm y proteína respectivamente, k_1 es la tasa de transcripción constitutiva, k_2 es la tasa de traducción, d_1 es la tasa de degradación de ARNm y d_2 es la tasa de degradación de p.

$$\dot{m} = k_1 - d_1 m \tag{1}$$

$$\dot{p} = k_2 m - d_2 p \tag{2}$$

Por el contrario, si la expresión genética es controlada por factores de transcripción ya sea activándola o inhibiéndola, se tiene una expresión *regulada* por un activador o un represor, según sea el caso.

$$\text{Gen} \overset{\text{Activador/Represor}}{\underset{\downarrow\perp}{\longrightarrow}} \underset{\substack{\downarrow \\ \emptyset}}{\text{ARNm}} \longrightarrow \underset{\substack{\downarrow \\ \emptyset}}{\text{Proteína}}$$

Esta regulación puede modelarse a través de una función de Hill [1] que señala la probabilidad de que un factor de transcripción (activador o represor) se una a la ARNp e inicie la etapa de transcripción. Por ejemplo, para un activador cuanto mayor sea su concentración, mayor será la producción de proteína. Manteniendo (2), la expresión genética regulada de (1) ahora resultaría:

$$\dot{m} = k_1 \frac{A^n}{K^n + A^n} - d_1 m \tag{3}$$

donde A es la concentración de activador, k_1 es la tasa máxima de transcripción, K es el coeficiente de activación, n es el coeficiente de Hill (número de activadores necesarios para unirse cooperativamente al promotor e iniciar activación de la expresión del gen). Si se considera un represor, la ecuación (3) se escribiría como:

$$\dot{m} = k_1 (1 - \frac{A^n}{K^n + A^n}) - d_1 m \tag{4}$$

2.2. Modelo de un circuito sintético genético de tres genes

Los conceptos anteriores pueden ser aplicados en el modelado de la red sintética formada por 3 genes gA, gB y gC que codifican a distintas proteínas A, B y C (Figura 2A). La proteína A se expresa en forma constitutiva a partir de gA. La molécula de inductor I [6] es capaz de difundirse a través de la membrana celular, lo que nos permite modificar su concentración externamente (Ie).

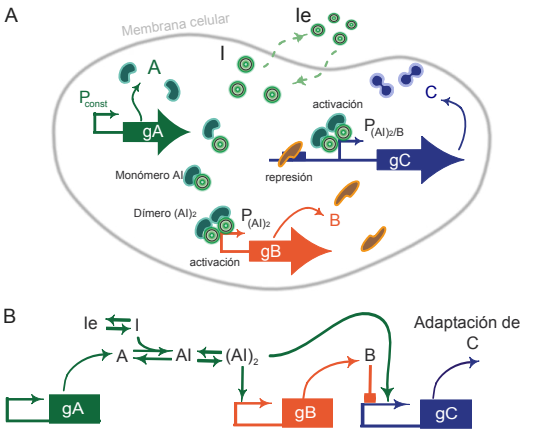


Figura 2: A) Circuito sintético genético de 3 nodos gA, gB y gC. B)Secuencia de las reacciones bioquímicas presentes en el circuito.

Dentro de la célula, una molécula de I reacciona con una molécula de A para formar el monómero

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

(AI). A su vez, dos moléculas de (AI) forman el factor de transcripción $(AI)_2$ que activa la expresión genética tanto de gB como de gC (Figura 2B). Posteriormente, como producto de la expresión de gB se obtiene la proteína B que a su vez reprime la expresión de gC dejando de producir proteína C. El gen gC tiene un promotor híbrido que activa la generación de la proteína C cuando está ocupado por el dímero $(AI)_2$, y la reprime cuando está ocupado por B. En caso de que ambos $(AI)_2$ y B ocupen el promotor, la inhibición domina sobre la activación. Las reacciones bioquímicas que expresan el proceso anterior se muestran a continuación, teniendo en cuenta que: RNAp es la ARN polimerasa, $\emptyset$ es la degradación de cada especie, y m_A, m_B y m_C es el ARNm correspondiente a A, B y C respectivamente. Las reacciones correspondientes al gen A son las siguientes:

$$\begin{aligned}
gA + RNAp &\underset{k_{-1}}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} gA{\cdot}RNAp \\
gA{\cdot}RNAp &\xrightarrow{k_{m_A}} gA + RNAp + mA \\
mA &\xrightarrow{k_{p_A}} mA + A \\
mA &\xrightarrow{d_{m_A}} \emptyset \\
A &\xrightarrow{d_A} \emptyset \\
A + I &\underset{k-2}{\overset{k_2}{\rightleftharpoons}} AI \\
\emptyset &\xrightarrow{k_e} Ie \\
Ie &\underset{k_{-d}}{\overset{k_d}{\rightleftharpoons}} I \\
I &\xrightarrow{d_I} \emptyset \\
2\,(AI) &\underset{k_{-3}}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} (AI)_2 \\
(AI) &\xrightarrow{d_{AI}} \emptyset \\
(AI)_2 &\xrightarrow{d_{AI2}} \emptyset
\end{aligned}$$

Mientras que las correspondientes al gen B:

$$\begin{aligned}
gB + (AI)_2 &\underset{k_{-4}}{\overset{k_4}{\rightleftharpoons}} gB{\cdot}(AI)_2 \\
gB{\cdot}(AI)_2 + RNAp &\underset{k_{-7}}{\overset{k_7}{\rightleftharpoons}} gB{\cdot}(AI)_2{\cdot}RNAp \\
gB \cdot (AI)_2 \cdot RNAp &\xrightarrow{k_{m_B}} gB{\cdot}(AI)_2 + RNAp + mB \\
mB &\xrightarrow{k_{p_B}} mB + B \\
mB &\xrightarrow{d_{m_B}} \emptyset \\
B &\xrightarrow{d_B} \emptyset
\end{aligned}$$

y finalmente las reacciones correspondientes al gen C:

$$\begin{aligned}
gC + (AI)_2 &\underset{k_{-5}}{\overset{k_5}{\rightleftharpoons}} gC{\cdot}(AI)_2 \\
gC{\cdot}B + (AI)_2 &\underset{k_{-6}}{\overset{k_6}{\rightleftharpoons}} gC{\cdot}B{\cdot}(AI)_2 \\
gC{\cdot}(AI)_2 + B &\underset{k_{-8}}{\overset{k_8}{\rightleftharpoons}} gC{\cdot}B{\cdot}(AI)_2 \\
gC + B &\underset{k_{-9}}{\overset{k_9}{\rightleftharpoons}} gC{\cdot}B \\
gC{\cdot}(AI)_2 + RNAp &\underset{k_{-10}}{\overset{k_{10}}{\rightleftharpoons}} gC{\cdot}(AI)_2{\cdot}RNAp \\
gC{\cdot}(AI)_2{\cdot}RNAp &\xrightarrow{k_{m_C}} gC{\cdot}(AI)_2 + RNAp + mC \\
mC &\xrightarrow{k_{p_C}} mC + C \\
mC &\xrightarrow{d_{m_C}} \emptyset \\
C &\xrightarrow{d_C} \emptyset
\end{aligned}$$

A partir de estas reacciones y aplicando la ley de acción de masas de la sección 2.1, se puede obtener un modelo con 20 ecuaciones ODE para describir el circuito sintético. Con el objetivo de una programación y simulación eficientes que disminuyan el coste computacional y el análisis de del conjunto de reacciones, este modelo es reducido a un modelo de menor orden. Para ello, nos hemos basado en la existencia de invarianza de algunas de las especies (gA, gB, gC), el uso de la técnica *Quasi steady-state approximation* (QSSA) [3] para sistemas con separación de escala temporal, y la aproximación con funciones de Hill para un activador y represor.

A continuación se presentan las ecuaciones del modelo reducido obtenido (5-13), donde las concentraciones medidas en nM son: $\dot{x_1} = m_A, \dot{x_2} = A, \dot{x_3} = I, \dot{x_4} = (AI)_2, \dot{x_5} = m_B, \dot{x_6} = B, \dot{x_7} = m_C, \dot{x_8} = C, \dot{x_9} = Ie$, y $ke(t)$ es la entrada escalón a la célula.

$$\dot{x_1} = k_{mA} C_{gA} - d_{mA} x_1 \tag{5}$$
$$\dot{x_2} = k_{pA} x_1 - d_A x_2 - k_2 x_2 x_3 + k_{-2} M \tag{6}$$
$$\dot{x_3} = -k_2 x_2 x_3 + k_{-2} M + k_d x_9 - k_{-d} x_3 - d_I x_3 \tag{7}$$
$$\dot{x_4} = k_3 M^2 - 2k_{-3} x_4 - d_{AI2} x_4 \tag{8}$$
$$\dot{x_5} = \frac{K_{mB}\, C_{gB} x_4}{\theta_1 + x_4} - d_{mB} x_5 \tag{9}$$
$$\dot{x_6} = k_{pB} x_5 - d_B x_6 \tag{10}$$
$$\dot{x_7} = \frac{K_{mC} C_{gC} x_4}{\theta_2 + \theta_3 x_4 + \theta_4 x_6 + \theta_5 x_4 x_6} - d_{mC} x_7 \tag{11}$$
$$\dot{x_8} = k_{pC} x_7 - d_C x_8 \tag{12}$$
$$\dot{x_9} = ke(t) - k_d x_9 + k_{-d} x_3 - d_{Ie} x_9 \tag{13}$$

donde M es la concentración del monómero (AI),

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 1: Tasas y constantes del circuito sintético genético de 3 genes, donde Cte es constante.

Constante	Descripción	Unidad
$k_{m_A}, k_{m_B}, k_{m_C}$	Transcripción de gA, gB, gC	min^{-1}
$k_{p_A}, k_{p_B}, k_{p_C}$	Traducción de m_A, m_B, m_C	min^{-1}
k_d, k_{-d}	Difusión de I e I_e	nM
d_{AI}	Degradación de (AI)	min^{-1}
d_{AI2}	Degradación de $(\text{AI})_2$	min^{-1}
k_2, k_3	Asociación de (AI) y $(\text{AI})_2$	min^{-1}
k_{-2}, k_{-3}	Disociación de (AI) y $(\text{AI})_2$	min^{-1}
$C_{g_A}, C_{g_B}, C_{g_C}$	Copias de gA, gB, gC	min^{-1}
θ_1	Constante promotor gB	min^{-1}
$\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$	Constante promotor gC	min^{-1}
$d_{m_A}, d_{m_B}, d_{m_C}$	Degradación de m_A, m_B, m_C	min^{-1}
d_A, d_B, d_C	Degradación de A, B, C	min^{-1}
d_I, d_{I_e}	Degradación de I, Ie	min^{-1}
d_{AI}, d_{AI2}	Degradación de (AI), $(\text{AI})_2$	min^{-1}

que responde a la relación algebráica:

$$M = -\frac{d_{AI} + k_{-2}}{2k_3} + \frac{1}{2k_3}\sqrt{(d_{AI} + k_{-2})^2 + 4k_3(k_2 x_5 x_6 + 2k_{-3} x_8)} \quad (14)$$

En el modelo anterior se realizaron las siguientes suposiciones [3, 4]: **a)** la expresión de m_A, m_B, m_C y (AI) está en estado cuasi-estacionario porque alcanza el estado estable mucho antes que el resto de especies de la red (QSSA), **b)** el monómero (AI) es la raíz positiva de la ecuación (14), **c)** los promotores de (9) y (11) son funciones de Hill para la activación de la expresión de gB y la represión de gC, y **d)** el modelo de la ARNp no se incluye porque es abundante y su dinámica es muy rápida. La Tabla 1 describe las constantes utilizadas en el modelo reducido. Los valores de algunos de estos parámetros pueden ser obtenidos de la literatura [13]. Otros sin embargo, como por ejemplo los parámetros $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ deben ser estimados dentro de rangos biológicamente razonables en función del comportamiento deseado para el circuito genético.

2.3. Adaptación en circuitos genéticos

La adaptación es la característica que poseen los circuitos genéticos para responder a un cambio de su entrada y retornar al valor que se tenía previo al estímulo, aún cuando el cambio de la entrada persista.

En la Figura 3 se muestra la descripción matemática de dos índices de medida de la capacidad de adaptación de un circuito: sensitividad y precisión [7]. La *sensitividad* mide el cambio (magnitud del pico) de la salida después de la estimulación, mientras que la *precisión* detecta si la salida estimulada regresó al valor anterior al cambio en la entrada, es decir, el error de la salida.

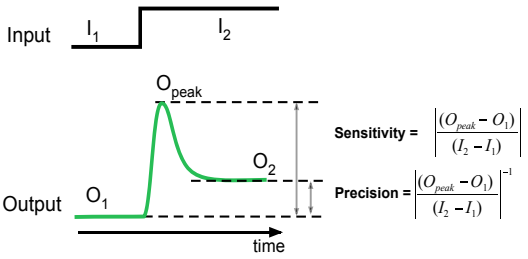


Figura 3: Representación gráfica y matemática de la adaptación de un circuito genético.

3. Optimización Multi-Objetivo

El problema de diseño en ingeniería en general y cuando se diseñan circuitos genéticos en particular, involucra la búsqueda de una solución de compromiso entre diferentes requerimientos y necesidades. Se dice una solución de compromiso, ya que la mayoría de las veces los requerimientos son excluyentes entre sí, esto es, la optimización de uno de ellos conduce a empeorar algún otro.

La capacidad de adaptación (sección 2.3) implica que el circuito tenga tanto buena sensitividad como precisión, y como se verá más adelante estos dos objetivos de diseño que nos planteamos son contrapuestos. La existencia de múltiples requerimientos y necesidades identificados en un problema de diseño, nos lleva a hablar de un problema multi-objetivo [8].

Un planteamiento común para afrontar un problema de optimización multi-objetivo, consiste en construir una función que logre aglutinar en un único índice los objetivos de interés. Normalmente, se emplea un vector lineal de pesos, sin embargo, la solución obtenida depende demasiado de una correcta elección de los mismos y puede no reflejar adecuadamente las preferencias del diseñador en relación al balance de prestaciones deseado.

Otra opción es la optimización multi-objetivo (MOO) [9], que es una alternativa natural para afrontar un problema multi-objetivo. En la MOO, todos los objetivos son importantes para el diseñador, por lo que todos son optimizados simultáneamente y la solución suele no ser única, sino un conjunto de soluciones conocido como conjunto de Pareto. En dicho conjunto, todas las soluciones son óptimas y ninguna es mejor que otra, solo difieren entre sí por el grado de compromiso que guardan entre los objetivos optimizados.

3.1. Planteamiento del problema

Nuestro problema de MOO consiste en encontrar el conjunto de valores para las 26 variables de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

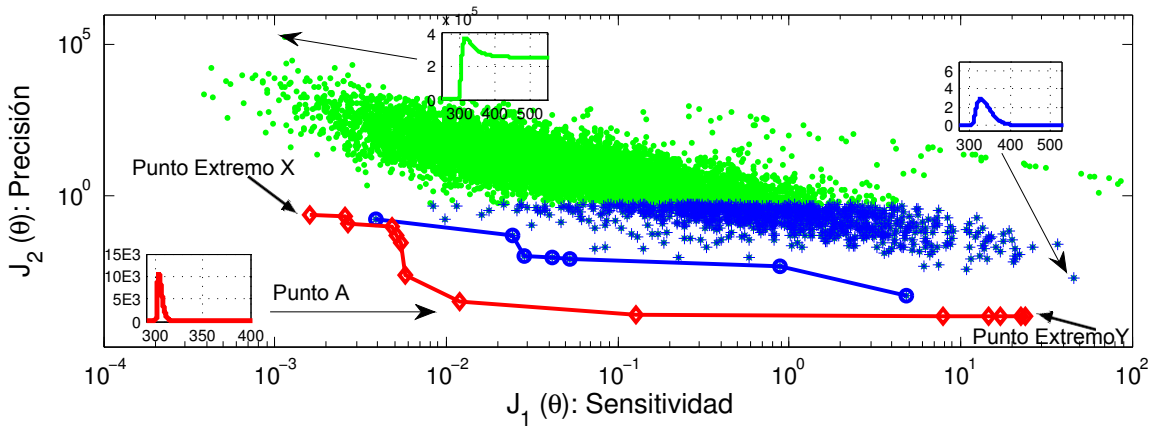


Figura 4: Representación típica de un frente de Pareto para 2 objetivos con MOO (rojo), junto con un muestreo aleatorio de igual coste computacional (puntos verdes), el muestreo luego de seleccionar el sector de interés (puntos azules) y el frente de pareto obtenido por filtrado de este muestreo (línea azul). Así mismo se observan las respuestas temporales de la Proteína C para tres puntos representativos. La respuesta del punto verde tiene una precisión muy mala (por este motivo fueron descartados los puntos verdes), y el punto azul tiene una sensitividad mala (la altura del pico es muy baja, sin embargo el sistema responde a la perturbación y tiene buena precisión). Por otro lado, el punto A presenta un buen equilibrio entre sensitividad y precisión.

decisión $\boldsymbol{\theta}$ correspondientes a los parámetros del modelo (5-13), para minimizar los siguientes dos objetivos:

$$\min_{\boldsymbol{\theta}\in\Re^{26}} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}) \quad = \quad [J_1(\boldsymbol{\theta}), J_2(\boldsymbol{\theta})] \in \Re^2$$

con:

$$J_1(\boldsymbol{\theta}) \quad = \quad \frac{2(x_9(t_f) - x_9(t_0))}{\int_{t_0}^{t_f} |\frac{dx_8}{dt}| dt} \qquad (15)$$

$$J_2(\boldsymbol{\theta}) \quad = \quad \frac{x_8(t_f) - x_8(t_0)}{x_9(t_f) - x_9(t_0)} \qquad (16)$$

En este caso, J_1 representa el inverso de la variación total absoluta de x_8 (Concentración de proteína C) normalizada con respecto al cambio en x_9 (Concentración de la entrada Ie), es decir la sensitividad. Por otro lado, J_2 representa la variación total de x_8 normalizado con respecto al cambio en x_9, es decir la precisión. La minimización de estos dos objetivos nos conducirá a determinar un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas, diferentes únicamente por el grado de compromiso entre objetivos. El conjunto de soluciones óptimas conforma el conjunto de Pareto $\boldsymbol{\Theta_P}$, y su proyección en el espacio de objetivos como frente de Pareto $\boldsymbol{J_P}$.

El problema de MOO busca determinar la mejor aproximación posible $\boldsymbol{\Theta_P^*}$ del conjunto de Pareto $\boldsymbol{\Theta_P}$ que genera la mejor aproximación de Pareto $\boldsymbol{J_P^*}$. Dicha busqueda se puede realizar mediante un muestreo aleatorio (tipo Monte-Carlo) del espacio de variables de decisión $\boldsymbol{\Theta}$, es decir, de parámetros de nuestro modelo, para luego filtrar las soluciones y obtener los $\boldsymbol{\Theta_P^*}$ que generan el frente $\boldsymbol{J_P^*}$ como se muestra en la Figura 4. Para problemas pequeños esto puede ser una buena opción, pero para problemas como el nuestro $(mxn) = (26x2)$ es más eficiente emplear algoritmos de MOO para encontrar una mejor aproximación a dicha solución. En nuestro caso, se ha utilizado el algoritmo $sp - MODE$[1] [11] que es un algoritmo evolutivo de optimización multi-objetivo (MOEA). Con este se obtuvo una mejor aproximación al frente de Pareto como se ve en la Figura 4.

La selección de una solución de compromiso, de acuerdo a las preferencias del diseñador, toma lugar en un análisis *a-posteriori* en el frente de Pareto $\boldsymbol{J_P^*}$. En este trabajo, para visualizar el frente calculado se utiliza la herramienta Level Diagram[2] (LD) [2, 10]. Un LD es una alternativa para la visualización y análisis del conjunto y frente m-dimensionales, lo cual no es una tarea trivial cuando el número de objetivos es mayor que 3 y/o cuando el número de variables de decisión en el conjunto de Pareto es elevado como en nuestro caso. Los LD se basan en la clasificación del conjunto de Pareto $\boldsymbol{\Theta_P^*}$ calculado y haciendo que cada objetivo $J_q(\boldsymbol{\theta})$ esté normalizado con respecto a su mínimo y máximo valor. Para cada vector normalizado $\hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\theta})$ se aplica la norma-p $\|\hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\theta})\|_p := \left(\sum_{q=1}^{m} \|\hat{J}(\boldsymbol{\theta})_q\|^p\right)^{1/p}$ para evaluar la

[1] Herramienta disponible en `http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39215`

[2] Herramienta disponible en `http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24042`

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

distancia a la solución ideal $\boldsymbol{J}^{ideal} = \boldsymbol{J}^{min}$.

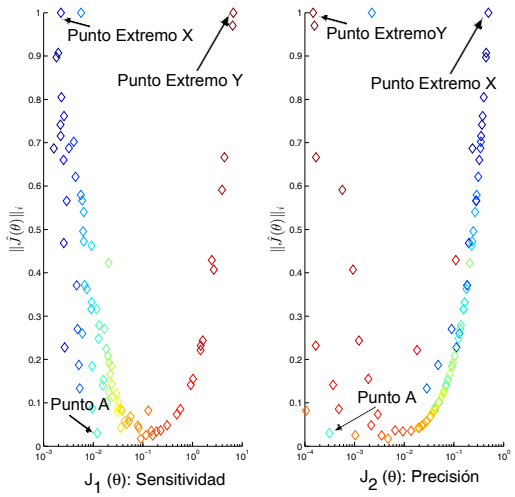


Figura 5: Representación de un frente de Pareto para 2 objetivos utilizando Level Diagrams para el frente de Pareto utilizando MOO. Soluciones en el mismo nivel en el LD tienen correspondencia en cada gráfica.

En el LD (ver Figura 5) se despliega un gráfico para cada objetivo $q \in [1, \ldots, m]$ y otro para cada variable de decisión $l \in [1, \ldots, n]$, ver Figura 6, donde el eje de ordenadas es $\|\hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\theta})\|_p$ y el eje de abcisas corresponde al valor del objetivo o variable de decisión según sea el caso. Por lo tanto, una solución dada tendrá el mismo valor-y en todas las gráficas. Así mismo, se ha modificado el LD para que los puntos de ambas gráficas utilicen el siguiente código de color: desde azul que representa pequeños valores de $J_1(\boldsymbol{\theta})$, hasta rojo que simboliza altos valores de $J_1(\boldsymbol{\theta})$. Para facilitar el análisis, también se han representado las respuestas dinámicas del modelo junto con las proporciones de traducción/degradación empleando el mismo código de color.

Por ejemplo, el punto extremo X (Figura 4 y 5) que es de color azul por tener un valor pequeño de $J_1(X) = 0.025$, tiene una norma $\|\hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{X})\| = 1$. El mismo punto X se refleja tanto en las gráficas del resto de objetivos como en las de las variables de decisión, con el mismo color y la misma norma. Tal correspondencia ayuda a evaluar e identificar tendencias generales sobre el frente y conjunto de Pareto y nos permite inferir pautas de diseño de nuestro circuito genético.

4. Resultados y Discusión

Sobre la base del frente de Pareto y conjunto de parámetros óptimos obtenidos utilizando el marco de MOO, y junto con las respuestas dinámicas del modelo y las proporciones de traducción/degradación que se han incorporado en este trabajo, es posible realizar un análisis y determinar pautas para el diseño del circuito genético con adaptación.

Tabla 2: Tendencia de los parámetros optimizados para el circuito sintético de 3 nodos. Los parámetros k_d y d_{Ie} fueron fijados de acuerdo a la naturaleza del modelo.

Parámetro	**Adaptación**		**Rango**
	Sensitividad Alta	Precisión Alta	
$k_{m_A} C_{g_A}$	⇊	↓	[1 200]
$k_{m_B} C_{g_B}$	↓	↑	
$k_{m_C} C_{g_C}$	↑	⇊	
d_A	↓	↓	[0.01 0.1]
d_B	⇊	↑	
d_C	⇈	⇈	[0.1 0.5]
θ_1	↑	↑	[200 600]
θ_2	⇊	⇊	[0.01 0.2]
θ_3	⇊	⇊	[1e-4 1]
θ_4	⇊	⇊	[5e-4 10]
θ_5	⇈	⇈	[0.1 10]
k_{p_A}	↓	↑	[1 100]
k_{p_B}	⇊	⇊	
k_{p_C}	↑	↓	
k_{-2}	↑	↓	[1 20]
k_{-3}	-	-	[0.1 5]
kd_2	⇈	↓	[1 30]
kd_3	↓	↑	[100 250]
d_{m_A}	-	-	[0.01 0.5]
d_{m_B}	-	-	
d_{m_C}	⇈	⇈	
d_I	-	-	[0.001 0.5]
d_{AI}	⇊	↑	[0.01 0.5]
d_{AI_2}	⇊	⇊	
k_d	-	-	0.0164
d_{Ie}	-	-	0.0164

Para evaluar el grado de adaptación, se simula la respuesta dinámica del circuito conforme al conjunto de parámetros dado por el algoritmo de optimización, se perturba la entrada Ie y se observa el cambio en la concentración de la proteína C, y finalmente se calcula el valor de los objetivos de diseño propuestos. La Figura 4 representa el LD del frente de Pareto obtenido, mientras que la Figura 6 muestra la distribución de los parámetros conforme a la minimización de los objetivos de sensitividad y precisión. Seguidamente, la evolución temporal de las 9 especies bioquímicas del modelo se observa en la Figura 8, y las proporciones de traducción/degradación de las proteínas se exponen en la Figura 7.

En la Figura 6, algunos parámetros como por ejemplo θ_1 exhiben variabilidad en todo el rango de optimización [200 600], es decir, que cualquier valor seleccionado dentro de este intervalo dependerá únicamente del grado de sensitividad y precisión deseados, aunque su tendencia es tomar valores altos. Por el contrario, parámetros como θ_2, θ_3, θ_4 muestran una clara preferencia por valores pequeños, mientras que θ_5 tiende a valores grandes. El análisis de la distribución de los valores de las 26 variable de decisión se resume en la Tabla 2, proporcionando pautas de diseño para circuitos genéticos con adaptación y teniendo en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

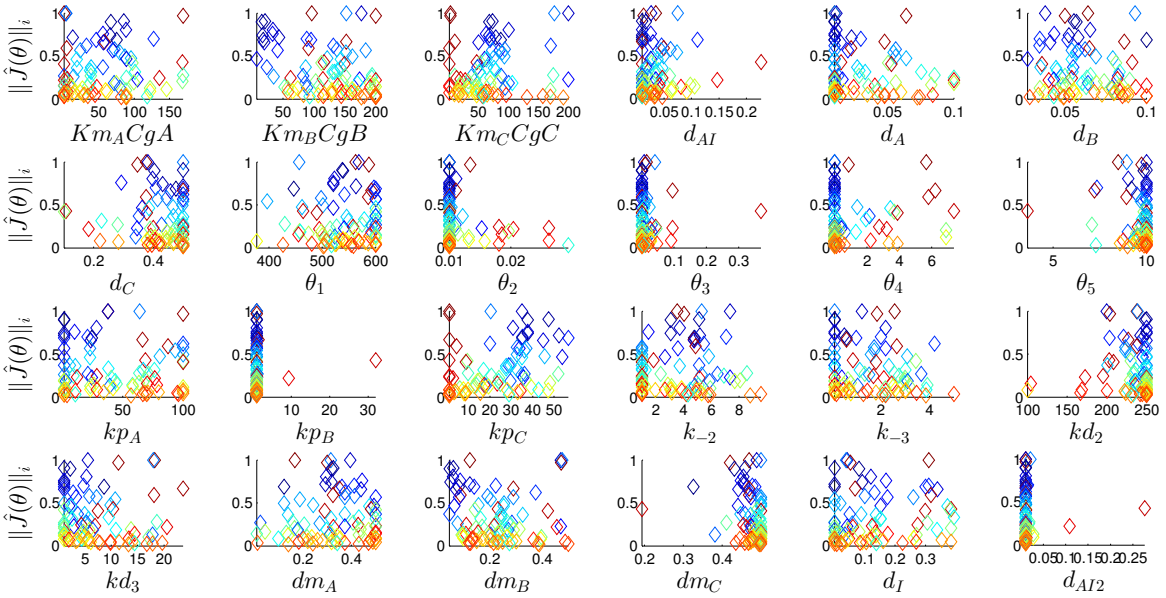


Figura 6: Variables de decisión (parámetros del modelo) obtenidos utilizando optimización multi-objetivo de los objetivos de diseño J_1 y J_2. La visualización se hace utilizando LevelDiagrams, es decir que un punto con cierto valor de $\|\hat{J}(\theta)\|_i$ está a la misma altura en todos los gráficos, tanto de variables de decisión como de objetivos.

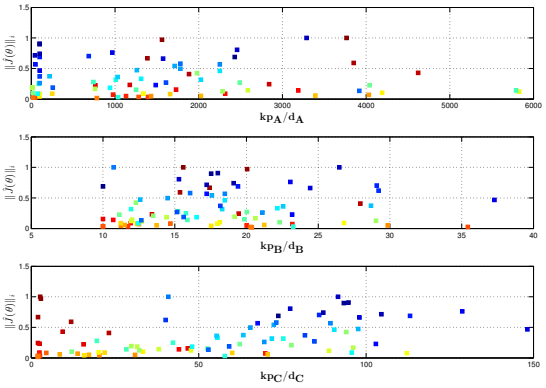


Figura 7: Proporciones de traducción/degradación de las proteínas. A) La tasa k_{p_A}/d_A adquiere valores mucho mayores con respecto a los de las otras pero no influye directamente en la sensitividad o precisión de la proteína C. B) La expresión de B con respecto a su degración (k_{p_B}/d_B) no varía significativamente con respecto a la sensitividad y precisión del circuito sintético presentado, siempre que se mantenga en el intervalo mostrado. C) Para una sensitividad alta k_{p_C}/d_C debe ser alta también, mientras que la precisión aumenta cuando k_{p_C}/d_C es baja.

cuenta el compromiso deseado entre los dos objetivos.

Se observa (Figura 8) que pequeñas concentraciones de proteína B inhiben rápidamente la expresión de la proteína C, y se aprecia claramente que en todas las respuestas obtenidas se alcanza adaptación. Confirmamos que una sensitividad alta se obtiene a costa de una baja precisión y viceversa, es decir, que los objetivos propuestos son excluyentes entre sí. Por lo tanto es necesario recurrir a un marco MOO para obtener todas las soluciones posibles que aseguran adaptación, y luego proceder a la selección de una solución de compromiso entre ambos objetivos para diseñar el circuito.

Agradecimientos

Agradecemos al Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España (FEDER-CICYT DPI2011-28112-C04-01 y TIN2011-28082) y a la Universitat Politécnica de València (Beca FPI/2013-3242).

Referencias

[1] Uri Alon. *An Introduction to Systems Biology. Desing Principles of Biological Circuits.* Champan and Hall/CRC, Edition, 2007.

[2] X. Blasco, J.M. Herrero, J. Sanchis, and M. Martínez. A new graphical visualization of n-dimensional pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 178(20):3908 – 3924, 2008.

[3] Yadira Boada, Alejandro Vignoni, and Jesús Picó. Reducción de modelos en biología sintética: Modelado y simulación de ruido y variabilidad en expresión genética. *XXXIV Jornadas de Automática 2013, Comité Español de Automática*, pages 589–596, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

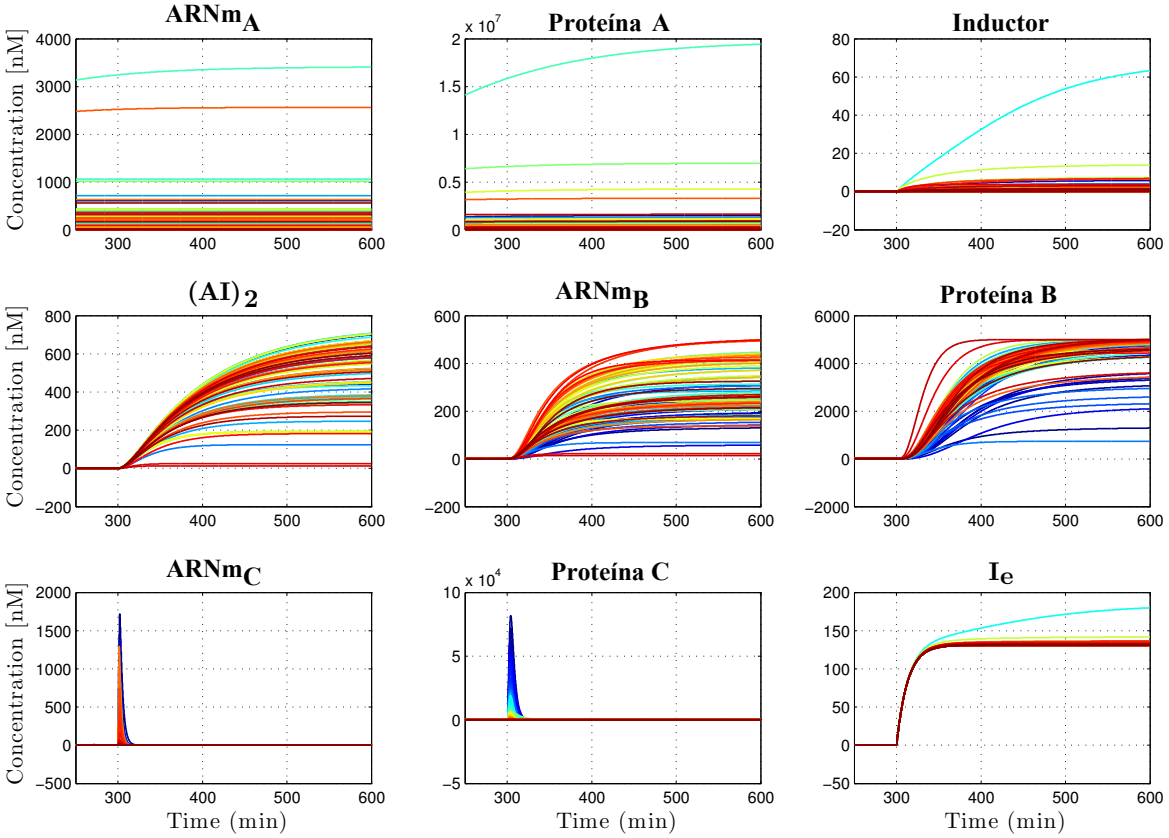


Figura 8: Evolución temporal de las 9 especies bioquímicas del modelo. Se aprecia la adaptación en la proteína C donde una buena sensitividad empeora la precisión y viceversa.

[4] Yadira F. Boada A. Gene expression modelling and simulation. model reduction and noise approximation. Master's thesis, Universitat Politècnica de València, September 2013.

[5] M. B. Elowitz and S. Leibler. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators. *Nature*, 403(6767):335–8, 1 2000.

[6] HB Kaplan and EP Greenberg. Diffusion of autoinducer is involved in regulation of the vibrio fischeri luminescence system. *Journal of Bacteriology*, 163(3):1210–1214, 1985.

[7] Wenzhe Ma, Ala Trusina, Hana El-Samad, Wendell A. Lim, and Chao Tang. Defining network topologies that can achieve biochemical adaptation. *Cell*, 138(4):760–73, 8 2009.

[8] R.T. Marler and J.S. Arora. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26:369–395, 2004.

[9] Kaisa Miettinen. *Nonlinear Multiobjective Optimization*, volume 12. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

[10] Gilberto Reynoso-Meza, Xavier Blasco, Javier Sanchis, and Juan M. Herrero. Comparison of design concepts in multi-criteria decision-making using level diagrams. *Information Sciences*, 221:124–141, 2013.

[11] Gilberto Reynoso-Meza, Javier Sanchis, Xavier Blasco, and Miguel Martínez. Design of continuous controllers using a multi-objective differential evolution algorithm with spherical pruning. *Applications of Evolutionary Computation*, pages 532–541, 2010.

[12] E. D. Sontag. Remarks on feedforward circuits, adaptation, and pulse memory. *IET Syst Biol*, 4(1):39–51, 1 2010.

[13] Marc Weber and Javier Buceta. Dynamics of the quorum sensing switch: stochastic and non-stationary effects. *BMC Syst Biol*, 7:6, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Estudio de la aplicación de estimulación eléctrica funcional para la mejora del funcionamiento de interfaces cerebro-computadora

Inmaculada Ríos, Enrique Hortal, José A. Flores, Javier Gimeno, José M. Azorín
Brain-Machine Interface Systems Lab, Edificio Innova. Universidad Miguel Hernández, Elche (Alicante)

Resumen

Existen muchos tipos de enfermedades neuromusculares que provocan que un gran número de personas sufran discapacidades funcionales. Estas discapacidades se suelen presentar en forma de miembros paralizados que limitan y/o impiden la interacción del individuo con el medio físico y social. Los dispositivos calificados como "Tecnologías de apoyo" están expresamente diseñados para acortar esas limitaciones. Dos de las tecnologías asistivas más avanzadas son las conocidas como Interfaz Cerebro-Computadora (ICC) y Estimulación Eléctrica Funcional (EEF) y debido a que están dirigidas al mismo grupo de usuarios su combinación puede resultar eficiente. En este texto será abordada la utilización de la EEF de los nervios periféricos de ambos brazos con el objetivo de obtener características más discriminantes entre las ondas EEG durante la imaginación del movimiento del brazo derecho e izquierdo, y aumentar, por tanto, el rendimiento del sistema ICC.

Palabras clave: Interfaces Cerebro-Computadora, Estimulación Eléctrica Funcional, neurorehabilitación de miembro superior.

1 INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de apoyo son la clave para mejorar la calidad de vida de personas con problemas de movilidad [7]. Pacientes que sufren parálisis cerebral, derrame cerebral, daños en la columna vertebral u otros problemas neuromusculares pueden, actualmente, disfrutar de dispositivos que les ayudan tanto a paliar algunos déficits en sus actividades de la vida diaria como en la rehabilitación de los miembros paralizados [4]. La imposibilidad para interactuar con el medio físico y social tiene un impacto muy negativo en estos pacientes en situación de discapacidad [26]. Existen muchos tipos de tecnologías asistivas que pueden ser clasificadas en función de diversos criterios [1],[2]. Las Interfaces Cerebro-Computadora (ICC) y la Estimulación Eléctrica Funcional (EEF) son dos de las técnicas de ayuda clasificados como de "alta tecnología" debido a su complejidad electrónica (Hi-Tech) [23],[28] y son frecuentemente combinadas ya que su diseño está destinado a pacientes con el mismo tipo de discapacidad: la disfunción motora [18].

Un sistema ICC genera comandos a partir del procesamiento de la actividad electrica del cerebro y los envía a otros dispositivos externos (silla de ruedas [5], brazo robótico [21], etc) para ejecutar la actividad sin necesidad de recorrer el trayecto normal de la información, es decir, desde el cerebro, por la espina dorsal hasta los nervios periféricos y, finalmente, a los músculos efectores del movimiento [27]. En el caso de las personas con enfermedades neuromusculares existe algún tipo de defecto en este mecanismo de transmisión de la información y por ello, las órdenes generadas por su cerebro nunca alcanzan los efectores y la tarea motora se ve imposibilitada [17].

Los sistemas ICC pueden ser de varios tipos en función de la profundidad de los electrodos en la cabeza del usuario utilizados para la adquisición de la actividad cerebral. Pueden ser invasivos (colocados dentro de la materia gris), parcialmente invasivos (colocados sobre el cerebro descubierto atravesando el cráneo; electrocorticografía, ECoG) o no invasivos (electrodos superficiales colocados sobre el cuero cabelludo, electroencefalografía, EEG y magnetoencefalografía, MEG) [19]. Las señales obtenidas mediante métodos invasivos tienen una mayor resolución pero requieren cirugía y la implantación de un cuerpo extraño dentro del cerebro provocando problemas de biocompatibilidad [3] y también problemas de inactivación del electrodo provocada por el recubrimiento del mismo con una capa de tejido glial que eventualmente le impide realizar su función de registro. Los métodos no invasivos captan las bioseñales del cerebro con más dificultad y distorsiones causadas por las capas protectoras del cerebro pero no requieren ningún tipo de cirugía. Los sistemas ICC no invasivos suelen estar basados en señales EEG debido a que los dispositivos de MEG son más costosos y voluminosos. Dichas señales EEG pueden ser originadas por la actividad eléctrica normal del cerebro (potenciales espontáneos) o por un estímulo externo ge-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

neralmente auditivo o visual (potenciales evocados) [30].

Por otro lado, la EEF es la segunda tecnología de apoyo utilizada en este proyecto. Su objetivo principal es mantener la masa muscular, aumentar el rango de movilidad y promover la neuroplasticidad en miembros paralizados. Durante la EEF se inducen corrientes a los músculos en forma de pulsos eléctricos para restaurar o mejorar su funcionamiento. Los electrodos que transmiten al cuerpo estos estímulos pueden estar colocados de tres formas diferentes: superficiales, percutáneos o implantados [22]. Para controlar la contracción del músculo estimulado las características del pulso eléctrico (amplitud, duración del pulso y frecuencia) pueden ser moduladas [16].

Ambas técnicas (ICC y EEF) están dirigidas a pacientes con disfunciones motoras por lo que su combinación es frecuente en muchos trabajos de investigación. Dicha combinación puede llevarse a cabo en dos sentidos. Por un lado se pueden utilizar los comandos obtenidos por ICC para controlar un sistema EEF como dispositivo externo de rehabilitación [25], [10] y por otro lado se puede utilizar la EEF para mejorar los patrones EEG mejorando, por tanto, el rendimiento de la ICC. La estimulación eléctrica del sistema nervioso central, concretamente del cerebro mediante métodos no invasivos (estimulación transcraneal por corriente directa, tDCS) ha arrojado resultados positivos en otras investigaciones [6]. Sin embargo, tiene algunos efectos secundarios como frecuentes dolores de cabeza, irritaciones en la piel y otras reacciones adversas en el caso de existir una enfermedad cerebral grave [8]. La segunda opción, y la elegida en este caso, es estimular eléctricamente los nervios periféricos del miembro involucrado en la tarea para modular los patrones EEG. La configuración del sistema se muestra en la figura 1.

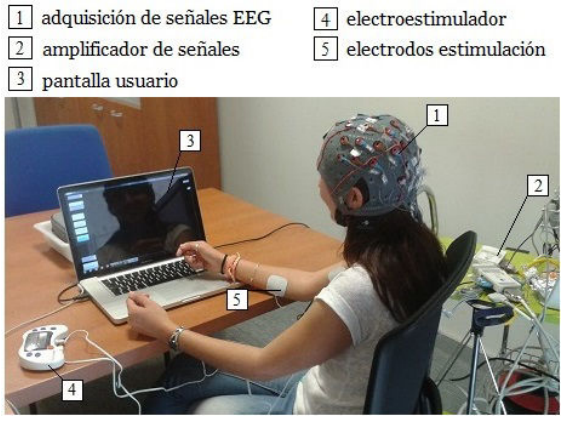


Figura 1: Configuración del sistema

2 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se analizan los materiales y métodos utilizados para la combinación de estas dos tecnologías (ICC y EEF) durante la realización del proyecto.

2.1 Protocolo Experimental

Durante el protocolo experimental se invitó a 4 voluntarios (sin discapacidades funcionales), dos hombres y dos mujeres, a la realización del experimento en una sala aislada de perturbaciones externas. Estos usuarios tenían edades comprendidas entre 25 y 28 años (25.5±1.7) siendo todos ellos diestros excepto el usuario 3. Sólo dos de los cuatro usuarios tenían experiencia previa con dispositivos ICC y adquisición de señales electroencefalográficas (usuario 1 y 4). Se obtuvieron potenciales espontáneos ya que no se utilizó ningún estímulo visual o auditivo y se realizaron registros off-line, es decir, sin ningún tipo de feedback para el usuario. Se llevaron a cabo tres experimentos diferentes:

1. Registro EEG sin estimulación eléctrica.

2. Registro EEG tras 15 minutos de estimulación eléctrica.

3. Registro EEG y estimulación eléctrica simultánea a la adquisición de las señales.

Durante las sesiones, el usuario recibe la orden de pensar en movimientos circulares lentos tanto de su brazo derecho como del izquierdo. En la pantalla vista por el usuario aparece el paradigma presentado en la figura 2 . El tiempo en el que se muestra la cruz en la pantalla es el tiempo de descanso, tras estos 3 segundos, aparece la imagen del brazo cuyo movimiento se debe imaginar y seguidamente se muestra un punto durante 10 segundos en los cuales el usuario debe imaginar el movimiento [12]. Está demostrado que la imaginación de un movimiento provoca la aparición de patrones en los ritmos cerebrales muy parecidos a los que se producen cuando se ejecuta el movimiento [9].

2.2 INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

El método ICC se compone de cinco etapas que se detallan a continuación: adquisición de las señales electroencefalográficas, preprocesamiento, procesamiento, extracción de características y clasificación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

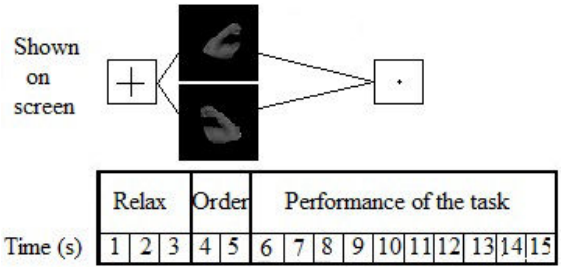


Figura 2: Paradigma temporal

2.2.1 ADQUISICIÓN DE LAS SEÑALES EEG

La adquisición de las señales EEG se realiza a través un gorro elástico (modelo g.GAMMAcap fabricado por la compañía g.Tec) que dispone de los electrodos colocados según el Sistema Internacional 10/20 en su modalidad extendida 10/10 [29]. Se conectan 16 electrodos concentrados sobre la corteza motora (aproximadamente a la mitad del cráneo) en las posiciones numeradas como: Fz, FC5, FC1, FCz, FC2, FC6, C3, Cz, C4, CP5, CP1, CP2, CP6, P3, Pz y P4, localizadas como se muestra en la figura 3.

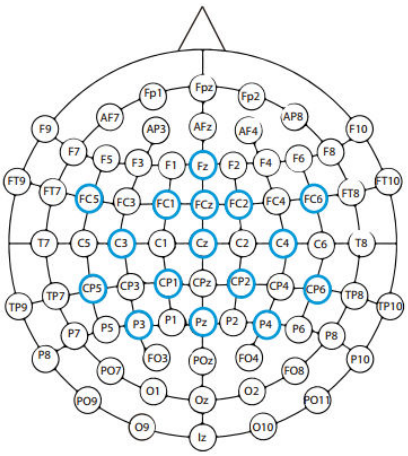


Figura 3: Colocación de los electrodos

Se coloca, además, un electrodo de referencia en el lóbulo de la oreja y el electrodo de tierra se sitúa en la posición AFz.

2.2.2 PREPROCESAMIENTO

Las 16 señales correspondientes a cada uno de los electrodos son transferidas a un amplificador (frecuencia de muestreo de 256 Hz) que además de amplificarlas las somete a dos tipos de filtrado. Se coloca un filtro notch a 50 Hz para eliminar las interferencias provocadas por la red eléctrica y un filtro paso-banda entre 0,1-100 Hz para eliminar la componente continua de las señales (anteriormente utilizado en [14]).

2.2.3 PROCESAMIENTO

La señal prefiltrada y amplificada llega al ordenador donde se procesa mediante un software desarrollado en Matlab, utilizando la API (Application Programming Interface) Matlab API gUSBAmp. Con este procesamiento se consiguen obtener las características de las señales para finalmente clasificarlas. Antes del procesamiento se aplica otro filtro de paso-banda entre 5 y 40 Hz, intervalo en el que se espera encontrar la mayoría de señales relativas a la actividad bioeléctrica del cerebro. Se realiza también un filtrado espacial mediante un filtro Laplaciano para mejorar la calidad de la señal. Este filtro actúa restando a cada electrodo la media de los 4 electrodos que lo rodean (arriba, abajo, derecha e izquierda) con el objetivo de amplificar su señal respecto del resto que provoca la distorsión. Posteriormente la señal se divide en fragmentos más pequeños conocidos como "ventanas" para facilitar el procesamiento. El tamaño de la ventana es un factor crítico ya que se debe encontrar cierto equilibrio entre velocidad de procesamiento y rendimiento de la clasificación. Fragmentos demasiado grandes ralentizan el procesamiento y fragmentos demasiado pequeños no contienen información suficiente para ser clasificados adecuadamente. La solución tomada en muchos casos es considerar ventanas más amplias pero solapadas entre sí de modo que se toman decisiones cada mitad del fragmento y la información se envía de forma redundante para su mejor clasificación. En este procesamiento se han fijado ventanas de 1 segundo solapadas entre sí 500 milisegundos (también utilizado en [14]) como se observa en la figura 4.

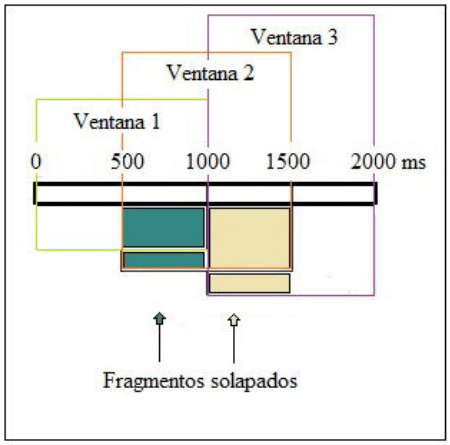


Figura 4: Solapamiento de los fragmentos de señal

Para la extracción de características se utiliza un método conocido como periodograma [13]. El pe-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

riodograma realiza el cálculo de la densidad de potencia espectral para detectar los fragmentos de señal que contienen más información. El método utiliza, en primer lugar, transformadas de Fourier discretas (DFT) para transladar los fragmentos de señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Posteriormente se eliminan las partes que tienen baja densidad de potencia conservando sólo los fragmentos que se presentan en frecuencias más relevantes y la señal se reconstruye a partir de los fragmentos seleccionados. Finalmente, se obtienen 29 características para la señal entre 8 y 36Hz con 1Hz de resolución.

2.2.4 CLASIFICACIÓN

Se utilizó el método SVM (Support Vector Machine) para la clasificación cuyo principal objetivo es dibujar un límite que separe las dos clases posibles (en nuestro caso imaginación del movimiento del brazo izquierdo y derecho) haciendo uso de las características obtenidas. En un espacio multidimensional de características, ese límite tendrá la forma de un hiperplano. El mejor hiperplano para la clasificación será aquel que equidiste de las dos clases, es decir, que las separe de forma óptima [15]. En este procedimiento se usó un clasificador SVM basado en RBF (Radial Basis Function) cuyos parámetros deben ser fijados. Los valores utilizados son $C = 512$, $\gamma = 0,002$ obtenidos de experimentos previos con el mismo clasificador [11].

2.3 ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA FUNCIONAL

El estimulador eléctrico utilizado fue adquirido de la empresa Quirumed (Functional Electrical Stimulator FES LIPO225) y contiene el equipo principal, que genera el pulso eléctrico, y cuatro electrodos con sus correspondientes conectores que transmiten dicho pulso al usuario. Se fijó el "Programa 9" en el equipo destinado a la estimulación contráctil de los músculos del miembro superior y los electrodos se colocaron sobre bíceps y extensor de ambos brazos [20] como se muestra en la figura 5.

Durante la estimulación la frecuencia fijada debe ser lo más baja posible para evitar estímulos dolorosos para el usuario [24].

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para los tres experimentos realizados se muestran en la tabla 1. En la primera columna se observa el número de usuario y en las tres siguientes se observan los resultados obtenidos en los experimentos:

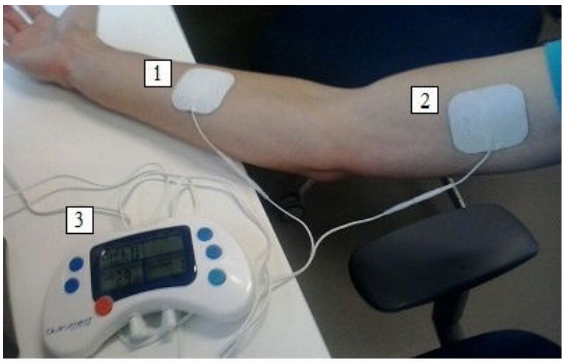


Figura 5: Posición de los electrodos de estimulación eléctrica funcional.

1) Sin estimulación;
2) Tras 15 minutos de estimulación;
3) Con estimulación simultánea al registro.

Los resultados se muestran como porcentaje de éxito, es decir, cuántas veces la señal es clasificada correctamente de cada 100 intentos. Se compara la predicción del clasificador con la orden que ha sido indicada al usuario en cada momento.

Tabla 1: Resultados obtenidos (% de acierto)

Usuario	1	2	3
1	67,69	75,17	59,27
2	55,96	57,20	56,04
3	50,58	49,42	48,84
4	83,94	89,74	78,64

4 CONCLUSIONES

En los resultados representados en la tabla 1 se puede observar un aumento en el porcentaje de acierto del experimento 2 respecto del 1, es decir, tras introducir 15 minutos de estimulación eléctrica antes del registro. Sin embargo, no se puede afirmar que sea debido a la estimulación eléctrica ya que el aumento no es uniforme y no se produce en todos los usuarios. Los experimentos realizados no son suficientes para alcanzar ninguna conclusión debido a la variabilidad de las señales electroencefalográficas que son frágiles e inconsistentes. Deberían realizarse más pruebas con usuarios (tanto sanos como pacientes) para poder concluir si existe una mejora debida a la introducción de la estimulación. Con respecto al experimento 3 se comprueba que el porcentaje de acierto disminuye en todos los casos lo que puede ser debido a que la estimulación simultánea

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

provoca la desconcentración del usuario en la realización de las tareas. En futuras investigaciones se descartaría este protocolo experimental. En nuevos proyectos se deberían modular los tiempos de estimulación y la posición de los electrodos para obtener mejores resultados.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España como parte del proyecto Brain2motion - Development of a Multimodal Brain-Neural Interface to Control an Exoskeletal: Neuroprosthesis Hybrid Robotic System for the Upper Limb (DPI2011-27022-C02-01), y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport of Generalitat Valenciana de España a través de la subvención FPA/2014/041.

Referencias

[1] Alcantud,F., (2000) Nuevas Tecnologías, viejas esperanzas. Las nuevas tecnologías en el ámbito de la discapacidad y las necesidades educativas especiales. Soto.F.J & López.J.A, Murcia (España).

[2] Basil,C., (1998) Sistemas de signos y ayudas técnicas para la comunicación aumentativa y la escritura. Masson, Barcelona (España).

[3] Beard,R.B., Schmukler,R., (1992) Biocompatibility considerations at stimulating electrodes interfaces. Annals of Biomedical Engineering.

[4] Bennet,S., Karnes,L., (1998) Neurological Disabilities: Assessment and Treatment. Lippincott Williams & Wilkins, (EEUU)

[5] Cao,L., Jiang,C., (2014) A hybrid BCI system based on the neurophysiological protocol and Brain-actuated switch for wheelchair control. Journal of Neuroscience Methods.

[6] Chavarriaga,R., (2013) tDCS Modulates motor imagery-related BCI features. Biosystems & Biorobotics, España.

[7] Cook,M.A., Hussey,S., (1995) Assistive Technologies. Mosby Elsevier, EEUU.

[8] DaSilva,A.F., Volz,M.S., Bikson,M., Fregni,F., (2011) Electrode positioning and montage in transcranial direct current stimulation. Journal of Visualized Experiments.

[9] Decety,J., Michel,F., (1989) Comparative analysis of actual and mental movements times in 2 graphic tasks. Brain Cognition.

[10] Do,A.H., Wang,P.T., King,C.E., Abiri,A., Nenadic,Z., (2011) Brain-Computer interface controlled Iunctional Electrical Stimulation system for ankle movement. Journal of Neuroengineering Rehabilitation.

[11] Flórez,F., Azorín,J.M., Iáñez,E., Úbeda,A., Fernández,E., (2011) Development of a low-cost SVM-based spontaneous BCI, International Conference on Neural Computation Theory and Applications.

[12] Guger,C., Schogl,A., Neuper,C., Walterspacher,T.D., Strein,T., Pfurtscheller,G., (2001) Rapid prototyping of an EEG-based BCI. IEES Transactions of Rehabilitation Engineering.

[13] Hippenstiel,R., Detection Theory: applications and digital signal processing. CRC Press.

[14] Hortal,E., Iáñez,E., Úbeda,A., Planelles,D., Azorín,J.M., (2013) Online classification of two mental tasks using a SVM-based BCI system. Neural Engineering (NER) 6th International IEEE/EMBS Conference, San Diego (California, EEUU).

[15] Hsu,C., Chang,C., Lin,C., (2010) A practical guide to Support Vector Clasification. Technical report, Department of Computer Science (Taiwan).

[16] Kralj,A., Bajd,T., (1989) Functional Electrical Stimulation: Standing and walking after spinal cord injury, CRC Press.

[17] Malamud,N., Hirano,A., (1974) Atlas of Neuropathy. University of California Press.

[18] Meng,F., Chan,S., Wong,W., Lui.K., Tang,K., Gao,X., Gao,S., (2010), BCI-FES training system design and implementation for rehabilitation of stroke patients. IEEE Xplore, Hong Kong.

[19] Nicolás-Alonso,L.F., (2012) Brain Computer Interfaces, a Review,Open Acess, Sensors, Valladolid, (España).

[20] O'Dwyer,S.B., O'Keefe,D.T., Coote,S., Lyons,G.M., (2006) An electrode configuration technique using an electrode matrix arrangement for FES-based upper limb arm rehabilitation systems. Elsevier.

[21] Onose,G., Grozea,C., Anghekesen,A., Daia,C., Sinescu,C.J., Ciurea, A.V., Spircu,T., (2012) On the feasibility of using motor imagery EEG-based BCI in chronic tetraplegic for assistive robotic arm control. Spinal Cord Journal.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[22] Peckham,H., Knutson,J., (2005) Functional electrical stimulation for neuromuscular applications. Annual Reviews on Biomedical Engineering.

[23] Pereira, J., (2011) Handbook of research on personal autonomy technologies and disability informatics. IGI Global, (EEUU).

[24] Ragnarsson,K.T., (2008), Functional electrical stimulation after spinal cord injury: current use, therapeutic effects and future directions. Nature.

[25] Rahman.K., (2012) The development of control system via Brain Computer Interface-Functional Electrical Stimulation for paraplegic subject. International Journal of Integrated Engineering, (Malasia).

[26] Rosenberg,D.E., Bombardier,C.H., Artherholg,S., Jensen,M.P., Motl,R.W., (2013) Self-reported depression and physical activity in adults with motor impairments. Archives of physical medicine and rehabilitation, (EEUU).

[27] Siegel,A., Hreday,N., (2010) Essential Neuroscience. Lippincott Williams & Wilkins.

[28] Tai,K., Blain,S., Chau,T., (2008) A review of emerging access technologies for individuals with severe motor impairments, Assistive Technologies. The official journal of RESNA, (Canadá).

[29] Transcranial technologies, (2012) Mannual of the 10/20 International system for electrodes positioning, (Hong Kong).

[30] Wolpaw,J., Winter-Wolpaw.E (2012) Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice. Oxford University Press.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA MOTORES BLDC

Diego Pérez Losada
diego.perez@aimen.es

Joaquín López Fernández, María Santos Fernández
joaquin@uvigo.es, mariasantos@uvigo.es

Resumen

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un controlador predictivo basado en modelo (MPC) para el control en velocidad de motores brushless de corriente continua (BLDC).

Los motores BLDC presentan algunas características que dificultan su utilización como tracción eléctrica de robots móviles en lugar de los habituales con escobillas. Es necesario disponer de etapas de potencia y control más sofisticadas que, añadidas al mayor coste de fabricación, incrementan notablemente el coste de las soluciones basadas en motores BLDC.

Con este trabajo se predende aprovechar una de las características de los motores BLDC con el fin de evitar el uso de un encoder para medir la velocidad de rotación, lo cual representa un notable ahorro en los motores de media potencia utilizados en robótica móvil. La solución obtenida se ha aplicado en el diseño y fabricación de dos robots móviles para aplicaciones diferentes, BellBot y WatchBot.

Palabras clave: Control predictivo, MPC, motor brushless, PID, módulo CAN.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la robótica, el control de motores es un campo de mejora continua, donde las soluciones ya implantadas y probadas evolucionan en paralelo con la tecnología utilizada, tanto en los propios motores como en los dispositivos de control. La introducción en el mercado de nuevas soluciones técnicas de motores y la mejora de las ya existentes conllevan el replanteamiento de la solución tecnológica más adecuada para la creación de nuevos robots o plataformas móviles.

Uno de los parámetros más importantes, como medida comparativa de la solución obtenida, es la densidad de potencia del conjunto, es decir, la relación entre la potencia necesaria par cumplir con las especificaciones funcionales y el volumen del conjunto utilizado. En este aspecto, los motores de corriente contínua sin escobillas (BLDC) presentan importantes ventajas respecto a los convencionales de corriente continua (DC) debido a su reducido volumen y sus elevadas prestaciones en velocidad, lo que permite utilizar mayores relaciones de reducción, añadido al bajo mantenimiento que necesitan.

El mayor inconveniente que presentan es su coste, puesto que está por encima de los motores equivalentes de corriente continua con escobillas. Una forma de paliar esta desventaja es evitar la instalación de un encoder en el eje del motor para medir su velocidad de rotación, puesto que el coste del encoder puede suponer entre un 15 y un 25 % del coste de un motor de media potencia. Los motores BLDC disponen de sensores de efecto Hall instalados en el estátor para conocer la posición del rotor en cada instante, pero su uso para determinar la velocidad de rotación instantánea presenta algunos inconvenientes si se pretende aplicar un controlador PID de elevada frecuencia como los que se vienen utilizando con los motores DC, debido a la baja resolución de la velocidad medida.

Otros autores han enfocado el control de motores BLDC desde otro punto de vista, como es el de utilizar la medida de la fuerza contraelectromotiz (BEMF) [6] [8] sobre las tres fases para determinar con mayor exactitud la posición del rotor [3]. En este artículo se parte de un motor que ya contine sensores Hall para la detección de la posición del rotor, siendo la solución comercial habitual para motores de mediana potencia.

En lo referente a la estrategia de control utilizada, existen abundantes soluciones basadas en reguladores PID, con implementaciones y optimizaciones de todo tipo [2], en la mayoría de los casos aplicadas a motores DC [4] pero también con soluciones orientadas a BLDC [15]. En lo referente a la utilización conjunta de control predictivo y reguladores PID, existen estudios previos como los presentados en [7] o en [13], donde se realiza un análisis sobre la viabilidad de aplicar control predictivo generalizado (GPC) para el control de motores sin escobillas. A diferencia de esta última aproximación, en este artículo se presenta un controlador que hace uso de un modelo MPC conjuntamente con un regulador PID, de modo que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

se puede actuar sobre el motor con información parcial sobre la velocidad de rotación.

La organización del artículo es la siguiente: a continuación se realiza una descripción detallada del problema abordado y en la siguiente sección se hace un breve análisis teórico del MPC. En la sección 4 se analiza la obtención del modelo del sistema y en la sección 5 se presenta la implementación realizada. Por último se realiza un análisis sobre los resultados en la sección 6 para finalizar con las conclusiones obtenidas.

2. DESCRIPCIÓN

En este trabajo se pretende diseñar e implementar un controlador PID predictivo basado en modelo (MPC) para el control de motores de corriente continua sin escobillas (BLDC).

Los motores de corriente continua que se utilizan habitualmente, como solución a la tracción eléctrica en robots y plataformas móviles, están siendo sustituidos por nuevos motores sin escobillas que presentan notables ventajas, como su reducido peso, su elevada velocidad y su menor mantenimiento. Los motores DC se instalan con encoders para medir la velocidad de rotación del eje del motor, o en algunos casos del eje de salida de la reductora. En el caso de los motores sin escobillas, existe la posibilidad de disponer de información sensorial prescindiendo de un encoder, que encarece de manera notable el conjunto motor-reductora.

Los motores BLDC disponen de un determinado número de polos que depende de las características eléctricas y de diseño, pero que en todo caso tienen una relación directa con la potencia y la velocidad. Los motores pequeños de elevadas revoluciones suelen disponer de un solo par de polos, pero al incrementar la potencia de salida también se incrementan los pares de polos. Para la situación que se aborda en este artículo se dispone de un motor con tres pares de polos. Para hacer girar el rotor es necesario ir conmutando la actuación sobre los diferentes polos situados en el estátor para provocar la rotación del eje, siendo necesario conocer la posición del mismo en cada instante. Para ello, se dispone de tres sensores de efecto Hall que permiten conocer la posición del rotor con una precisión π/n donde n representa el número de pares de polos.

La utilización de los sensores Hall para medir la velocidad de rotación del eje plantea algunos problemas, como son la imprecisión en la medida y la baja resolución. En este artículo se aborda el problema de la resolución alcanzada cuando se trabaja con controladores a una frecuencia de $100Hz$, que se corresponde con un periodo de muestreo $T = 10ms$. La velocidad mínima detectada a esta frecuencia es la indicada en la ecuación (1) que para tres pares de polos implica una detección de velocidad mínima superior a los $100rad/s$.

$$\omega_{min} = \frac{\pi}{nT} \tag{1}$$

Para evitar esta situación, se pretende utilizar control predictivo basado en modelo para mitigar el problema de la falta de información a baja velocidad, evitando tener que aumentar el periodo de control para reducir la velocidad mínima detectada. Esta aproximación al problema supone que no es necesario disponer de información sensorial en cada ciclo para actuar sobre el dispositivo de potencia que alimenta al motor, utilizando la predicción sobre la velocidad del sistema en función de las actuaciones anteriores.

3. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO

El control predictivo basado en modelo (MPC) representa un conjunto de diferentes métodos de control que comparten una estrategia y aproximación al problema similares. Con el MPC se obtienen controladores lineales que comparte una serie de características en común, independientes del método explícito de control utilizado [1].

Todo MPC dispone de un modelo del sistema que se quiere controlar, una función de optimización o función objetivo que se pretende minimizar y una estrategia de control con horizonte deslizante. La mayor parte de los métodos utilizados difiere principalmente en el tipo de modelo y en menor medida en las funciones de optimización. El control deslizante implica que en cada instante la predicción se va desplazando hacia el futuro.

3.1. Modelo del sistema

Es necesario disponer de un modelo preciso que represente la respuesta dinámica del sistema, de modo que en cada instante t se estiman las salidas futuras para un tenerminado horizonte de control de longitud N. La ecuación (2) representa la salida predicha en el instante t para el instante $t + k$.

$$\hat{y}(t + k|t) \tag{2}$$

En los métodos de control predictivo, las señales de control en los futuros intervalos del horizonte de control se calculan utilizando un critero de optimización. Este criterio debe permitir que la respuesta sea lo más próxima posible a la trayectoria de referencia prevista y representada como $r(t + k)$. La señal de control $u(t|t)$ es la que se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

envía al sistema, mientras que las señales futuras suelen descartarse en cada intervalo.

Para representar el modelo del sistema se puede hacer uso de distintos tipos de representación, aunque en este caso nos centraremos en la utilización de una función de transferencia como la mostrada en la ecuación (3), donde $A(z^{-1})$ y $B(z^{-1})$ representan sendos polinomios de grados $-na$ y $-nb$ respectivamente.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) \tag{3}$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_{na} z^{-na} \tag{4}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_{nb} z^{-nb} \tag{5}$$

Con la expresión de la ecuación (3) se pueden obtener las predicciones futuras basándose en la función de transferencia (6).

$$\hat{y}(t+k|t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t+k|k) \tag{6}$$

Al modelo de predicción del sistema es necesario añadirle el término que representa las perturbaciones. En la ecuación (7) se representan las perturbaciones $n(t)$ en cada instante, siendo $e(t)$ un ruido de media cero.

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})}{1 - z^{-1}} e(t) \tag{7}$$

3.2. Función objetivo

Para la obtención de la mejor respuesta posible, el control predictivo se apoya en un criterio de minimización de una función objetivo formada por dos términos (8). El primer término representa la desviación de la salida respecto a la trayectoria de referencia, mientras que el segundo sumando representa el esfuerzo de control. En este trabajo no se considera el segundo término, puesto que lo que se busca es minimizar la desviación sin tener en cuenta el esfuerzo de control. N_1 y N_2 representan el instante inicial y final entre los cuales se pretende seguir la trayectoria de referencia $w(t)$, que en este caso se considera de la longitud del horizonte de control, desde el instante inicial hasta el final.

$$\begin{aligned} &J(N_1, N_2, N_u) = \\ &= \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \\ &+ \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \end{aligned} \tag{8}$$

Por otra parte, la trayectoria de referencia se obtiene añadiendo las restricciones de aceleración y deceleración a la consigna $r(t)$, la cual se considera una constante invariable en el intervalo de predicción. Esto implica que minimizar el valor de la función objetivo será lo mismo que minimizar el error entre la consigna y la salida predicha en cada instante del intervalo de predicción teniendo en cuenta las restricciones.

4. OBTENCIÓN DEL MODELO

La solución planteada en este trabajo se basa en la predicción de la velocidad de un motor sin disponer de información sensorial basándose en el modelo del sistema, siendo necesario un modelo preciso que permita realizar predicciones de manera adecuada. Se realiza un procedimiento de identificación experimental para la obtención del modelo dinámico del conjunto formado por el motor y la etapa de potencia.

Para obtener el modelo, el controlador dispone de un modo de funcionamiento en bucle cerrado como controlador proporcional con ganacia Kp. En la Figura 1 se muestra un esquema del controlador donde se representa la ganacia aplicada Kp. El conversor de unidades de actuación, que se toma como unitario, se incluye dentro de la ganancia. La entrada del sistema $r(t)$ representa la consigna de velocidad, mientras que $u(t)$ es la salida del ciclo anterior más el error $e(t)$ del ciclo actual. $y(t)$ representa la velocidad medida del motor.

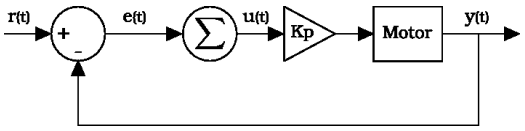


Figura 1: Esquema del modo de identificación.

Con un periodo de muestreo $T = 10ms$, el controlador obtiene los valores de la señal de excitación aplicada $r(t)$ que debe ser una señal pseudoaleatoria binaria (PRBS), de la entrada a la planta proporcional $u(t)$ y la salida del sistema en cada intervalo $y(t)$, durante un periodo de $15s$. Los valores de la ganacia Kp y la señal PRBS son previamente seleccionados para garantizar que el sistema cumple con las condiciones de excitación persistente descritas en [14].

El método de identificación utilizado es el ARIMA, que permite modelar de manera independiente la parte determinista y estocástica del sistema, aunque no se puede utilizar la regresión lineal para la estimación de parámetros, siendo necesario realizar una regresión pseudolineal. Con este método de identificación y análisis se obtiene un modelo paramétrico discreto de tercer orden. La resolución de la ecuación (9) se realiza minimizando el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

error predicho en cada instante de manera iterativa, aplicando el criterio de mínimos cuadrados extendido al no tratarse de una regresión lineal, tal como se ha indicado anteriormente.

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t-k) + \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(t) \qquad (9)$$

La resolución de la ecuación da como resultado una función de transferencia en lazo cerrado G_{cl}. Según el esquema de obtención del modelo representado en la Figura 1, la función de transferencia en lazo cerrado se obtiene mediante la ecuación (10) de donde se puede extraer la función de transferencia en lazo abierto tal y como se indica en la ecuación (11).

$$G_{cl}(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{PRBS} = \frac{K_p G(z^{-1})}{1 + K_p G(z^{-1})} \qquad (10)$$

$$G(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{G_{cl}(z^{-1})}{K_p(1 - G_{cl}(z^{-1}))} \qquad (11)$$

$G(z^{-1})$ representa la función de transferencia del conjunto formado por el motor BLDC y la etapa de potencia.

5. IMPLEMENTACIÓN

El controlador predictivo basado en un PID se ha implementado en un módulo embebido con comunicaciones CAN, de modo que puede ser integrado en cualquier robot o plataforma móvil. En este caso se ha integrado dentro de la arquitectura de control perteneciente al entorno de desarrollo RIDE [10], mediante la herramienta RoboCAN [5]. El algoritmo de control PID predictivo se ha implementado como un agente de ejecución distribuida en un módulo esclavo. Estos módulos están basados en un microcontrolador PIC de la serie dsPIC30, con paralelización de procesado en coma fija.

La estructura del controlador se muestra en el esquema de la Figura 2, donde se puede ver un control PID sobre el error entre la velocidad de referencia y la salida del conjunto formado por la etapa de potencia y el motor (Motor en la Figura). Para una velocidad de referencia $r(t)$ se obtiene el

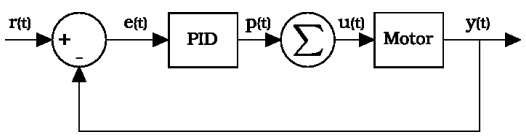


Figura 2: Esquema del conjunto regulador-planta.

error en cada instante como $e(t) = r(t) - y(t)$, que se corresponde con la señal de entrada al regulador PID. En la ecuación (12) se muestra la salida del regulador $p(t)$ como función de los errores.

$$p(t) = k_p e(t) + k_i \sum_{n=0}^{t} e(n) + \\ + k_d[e(t) - e(t-1)] \qquad (12)$$

La expresión está formada por tres sumandos, el primero de ellos se corresponde con la regulación proporcional, el segundo con la integral y el tercero con la diferencial. Cada una de las ganancias es configurable, permitiendo adaptar el controlador para actuar sobre motores diferentes o adaptar su respuesta en situaciones cambiantes.

Una de las principales características de la implementación del controlador, es que actúa como un regulador PID normal a medias y elevadas velocidades y como un PID predictivo a bajas velocidades. Cada vez que se recibe información de los sensores de efecto Hall se determina la velocidad de rotación del motor. Para evitar oscilaciones debidas a la elevada velocidad mínima detectada, tal como se ha descrito en la ecuación (1), se utiliza una media móvil ponderada para determinar la velocidad de rotación instantánea. Si la velocidad detectada no es nula, se calculan las salidas predichas para todo el horizonte de control de modo que se minimice el error respecto a la trayectoria de referencia.

A diferencia de otras implementaciones MPC, en esta no se descartan las predicciones en intervalos futuros. Si en el siguiente ciclo se sigue sin disponer de información sensorial para determinar la velocidad, se utiliza la estimación del error que corresponda. Como se ha mencionado anteriormente, el horizonte de predicción se corresponde con el de control, que puede ser modificado para ajustar las prestaciones del controlador a diferentes motores y configuraciones. En las dos implementaciones realizadas, se ha utilizado un horizonte de control $N_u = 10$.

$$\hat{e}(t+k) = r(t+k) - \hat{y}(t+k-1|t) \qquad (13)$$

En la ecuación (13) se representa el error predicho en un intervalo en función de la señal de referencia y de la predicción de la salida para el ciclo anterior. Este proceso se repite durante todo el horizonte de control o hasta que se pueda determinar la velocidad real del motor mediante la información obtenida con los sensores de efecto Hall.

Para velocidades que no sean bajas siempre se dispondrá de información en cada ciclo de muestreo, con lo que el funcionamiento del controlador será equivalente a utilizar un PID común, puesto que en ningún momento se utilizará la predicción

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la salida de un ciclo anterior para determinar la salida en un instante dado.

5.1. Parametrización del modelo

Tal como se ha descrito en la sección 4, para obtener el modelo del sistema se dispone de un modo de funcionamiento con un controlador proporcional, siguiendo el esquema de la Figura 1. La señal de entrada utilizada puede ser pseudo-aleatoria binaria o similar, debido a que no siempre será posible permitir que el robot se desplaze libremente para obtener el modelo del conjunto motor-etapa de potencia. Con los datos adquiridos durante el periodo de adquisición se realiza, con las salidas del sistema bloqueadas, un procesado para identificar la planta del sistema. Una vez obtenido el modelo dinámico del conjunto motor-etapa de potencia, se almacena en la memoria permanente del microcontrolador la parametrización correspondiente al modelo obtenido para utilizarla posteriormente.

5.2. Módulos hardware

En la Figura 3 se muestran dos controladores implementados en dos especificaciones diferentes del sistema de integración hardware RoboCAN [12]. En la parte superior se muestra la placa desarrollada sobre la versión v2, mientras que en la parte inferior se muestra el hardware creado con la especificación eléctrica de la versión v3. Tanto los microcontroladores como el software ejecutado son exactamente iguales, la diferencia entre estas dos versiones radica en la especificación de conexionado eléctrico de los módulos de control mediante un bus PCI-E.

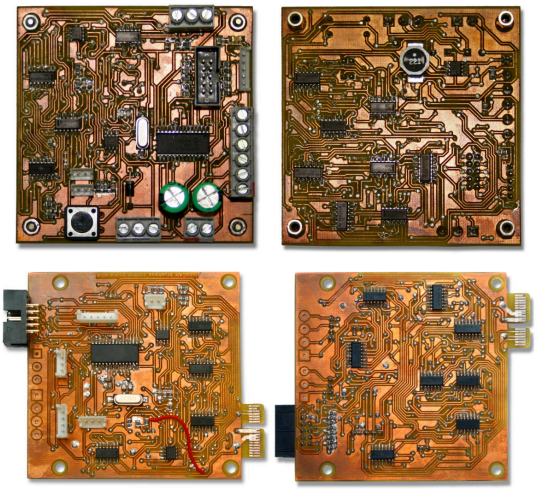


Figura 3: Módulos PID predictivo.

Cada módulo dispone de un microcontrolador dsPIC30F4012 y un circuito de adaptación para convertir las señales de los sensores de efecto Hall a dos señales de cuadratura. Esto permite aprovechar el periférico disponible en el microcontrolador para medir los pulsos de un encoder, a pesar de no disponer de un encoder propiamente dicho instalado en el eje del motor. Ambos módulos, además del controlador PID predictivo implementado como un agente, dispone de varios componentes software entre los que se encuentran el encoder, el motor y los sensores *bumper* que puedan ser instalados en el robot, tal como se describe en [12].

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos con la implementación del controlador predictivo basado en modelo. Se han diseñado una serie de pruebas con la finalidad de cuantificar la calidad de la solución obtenida.

La prueba para analizar la viabilidad de la solución propuesta se ha realizado con un motor BLDC en carga que dispone de un encoder instalado en el eje. Se ha utilizado este motor para realizar pruebas comparativas con señales de referencia conocidas, utilizando el controlador predictivo con las señales de los sensores de efecto Hall y repitiendo la prueba con un controlador PID que utiliza un encoder de 500 pulsos por vuelta. En la Figura 4 se muestra la respuesta de ambos controladores ante una entrada senoidal. Tanto la medida de la entrada como la respuesta en ambos casos (PID y PID predictivo) se ha realizado desde el servidor de comunicaciones CAN, por lo que aparece reflejado el retardo de transmisión y recepción del módulo, además del retardo de actuación.

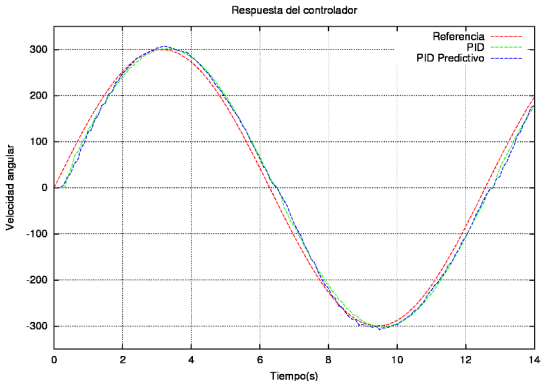


Figura 4: Respuesta del controlador.

Este retardo permite apreciar con mayor claridad la respuesta de ambos controladores, al estar la referencia y la salida desplazadas en el tiempo. La amplitud de la señal utilizada es de $300 rad/s$,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

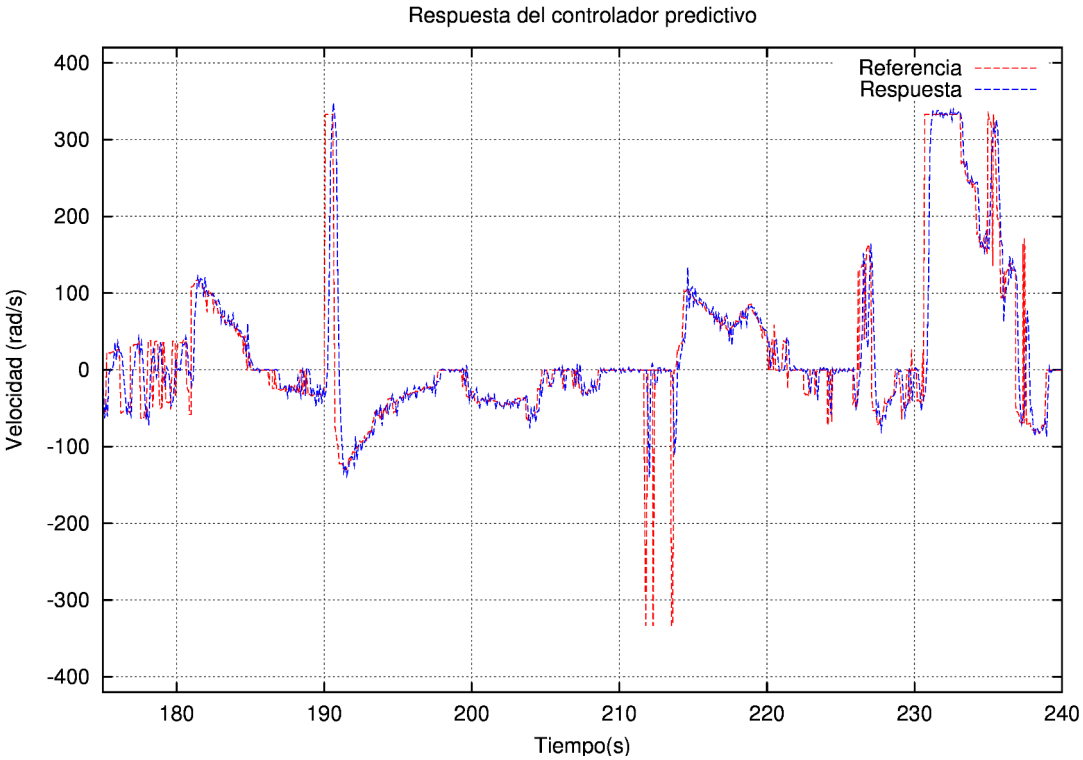


Figura 5: Navegación con PID predictivo.

lo cual representa una velocidad del motor de $2868rpm$. La zona en la que el controlador diseñado actúa como predictivo se sitúa por debajo de los $100rad/s$ y se puede observar que la desviación respecto al controlador que utiliza el encoder es muy reducida.

En la Figura 4 también se puede observar que la respuesta del controlador con modelo, en la zona que no actúa como predictivo, es más precisa que la que no tiene modelo, utilizando las mismas ganancias en ambos controladores PID. Esto es debido a la inclusión de la respuesta de la etapa de potencia en el proceso de parametrización del modelo ARIMA, quedando contemplados los retardos de propagación en el modelo MPC, a diferencia de la implementación sin modelo, en la cual solo se dispone de de un factor de conversión entre unidades.

Como muestra de las prestaciones del controlador predictivo, se incluye un gráfico que representa la actuación del regulador durante la navegación de un robot móvil. En la Figura 5 se muestra un gráfico con dos señales representadas, la primera de ellas se corresponde con la velocidad comandada al motor, mientras que la otra se corresponde con la respuesta del conjunto formado por el controlador predictivo, la etapa de potencia y el motor BLDC.

En los instantes que la señal de referencia varía notablemente se puede apreciar que el controlador predictivo aplica restricciones en la aceleración del motor, evitando movimientos bruscos. Estas restricciones se configuran dinámicamente y se utilizan para determinar la trayectoria de referencia en conjunto con la consigna de velocidad.

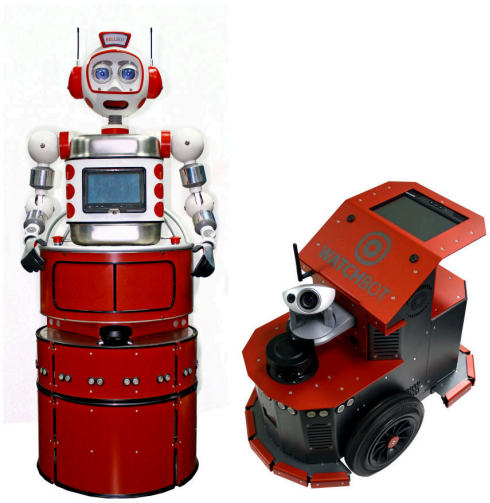


Figura 6: Robots con PID predictivo.

El controlador ha sido utilizado en el diseño e implementación de dos robot móviles que se mues-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tran en la Figura 6, siendo el de la izquierda un robot de configuración síncrona y el de la derecha, diferencial. El robot de la izquierda, BellBot [11], ha sido creado para operar en entornos hoteleros e interactuar con las personas, de ahí que disponga de una parte superior humanoide con cabeza y brazos, además de un diseño que resulte más atractivo para las personas. El robot de la derecha está diseñado para realizar tareas de vigilancia en interiores de edificios y ha sido desarrollado como parte complementaria de la arquitectura RIDE [9], aprovechando la inclusión de la herramienta de integración hardware y control distribuido RoboCAN.

7. CONCLUSIONES

La solución propuesta se ha implementado físicamente en un módulo hardware embebido y se ha integrado dentro de un sistema de comunicaciones basado en un bus de campo CAN. De este modo, el controlador predictivo propuesto ha sido utilizado en el diseño y construcción de dos robots móviles, pertenecientes al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Vigo. El controlador predictivo implementado lleva tiempo funcionando en ambos robots, mostrando unas características adecuadas para la navegación en entornos dinámicos.

Con la aplicación de la solución propuesta, queda probada la viabilidad de utilizar motores BLDC a bajas revoluciones haciendo uso sólo de los sensores Hall para determinar su velocidad de rotación.

Referencias

[1] C. B. Alba. *Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas*. Universidad de Sevilla, Aguadulce, Almería, 2000.

[2] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li. Pid control system analysis, design, and technology. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 13(4):559–576, July 2005.

[3] L. Bo, C. Binggang, J. Hui, Z. H. Bing, and Y. Hua. Position tracking controlling system of position sensorless bldcm by using smc. In *Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Proceedings of the 2nd IEEE/ASME International Conference on*, pages 1–5, Aug 2006.

[4] P. Dobra, D. Dumitrache, L. Tomesc, R. Duma, and M. Trusca. Low-cost embedded solution for pid controllers of dc motors. In *Control and Automation, 2009. MED '09. 17th Mediterranean Conference on*, pages 1178–1183, June 2009.

[5] J. Fernandez, M. Souto, D. Losada, R. Sanz, and E. Paz. Communication framework for sensor-actuator data in mobile robots. In *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, pages 1502–1507, june 2007.

[6] Y. Huang, Y. Xin, and W. Zhang. An improved bemf detection method for sensorless bldc motors. In *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*, pages 1–4, April 2008.

[7] M. Katebi and M. Moradi. Predictive pid controllers. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings* -, 148(6):478–487, Nov 2001.

[8] C. G. Kim, J. H. Lee, H. W. Kim, and M.-J. Youn. Study on maximum torque generation for sensorless controlled brushless dc motor with trapezoidal back emf. *Electric Power Applications, IEE Proceedings* -, 152(2):277–291, March 2005.

[9] J. López, D. Pérez, E. Paz, and A. Santana. Watchbot: A building maintenance and surveillance system based on autonomous robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013.

[10] J. López, D. Pérez, and E. Zalama. A framework for building mobile single and multi-robot applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 59:151 – 162, March 2011.

[11] J. López, D. Pérez, E. Zalama, and J. García-Bermejo. Bellbot - a hotel assistant system using mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 2012.

[12] D. P. Losada. *Arquitectura de control e ntegración robusta de dispositivos en robótica móvil*. PhD thesis, Universidad de Vigo, 2012.

[13] K.-S. Low, K.-Y. Chiun, and K.-V. Ling. Evaluating generalized predictive control for a brushless dc drive. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 13(6):1191–1198, Nov 1998.

[14] E. Rubio, L. Hernández, R. Aracil, R. Saltarén, and R. Moreno. Modelado, identificación y control de actuadores lineales electroneuáticos. aplicación en plataforma de dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4:58–69, 10 2007.

[15] C. Xia, W. Cao, and P. Song. The speed-adjustment system of brushless dc motor based on grey pid. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 35–38, Sept 2008.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MODELADO CINEMÁTICO DE UN MANIPULADOR BINARIO HIPER REDUNDANTE PARA APLICACIONES EN CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA (MIS)

José L. González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile, David de la Fuente
Instituto Universitario ITAP, Universidad de Valladolid
{jossan, turiel, jcfraile}@eii.uva.es

Rubén Alonso, Fernando Gayubo
Fundación CARTIF. Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid
{rubalo, fergay}@cartif.es

Resumen

Presentamos el análisis del problema cinemático directo de un manipulador binario hiper redundante diseñado para su aplicación en tareas de cirugía mínimamente invasiva, con el objetivo de actuar como soporte versátil de diferentes tipos de instrumentos que pueden ser utilizados en estas operaciones. Se describe el diseño modular del dispositivo y se aborda la problemática del modelado cinemático eficiente del mismo.

Palabras Clave: Modelado cinemático, Robot hiper redundante, Robótica médica, Cirugía mínimamente invasiva.

1 INTRODUCCIÓN

En este artículo se propone un robot manipulador modular hiper-redundante accionado mediante fuerzas electromagnéticas, diseñado para su uso en aplicaciones endoscópicas y se aborda la problemática que plantea su peculiar cinemática. La hipótesis de partida es que un robot de este tipo, con funcionamiento supervisado por un especialista, puede suponer una alternativa viable y ventajosa frente a otros dispositivos actualmente disponibles en este tipo de aplicaciones.

Varios investigadores han propuesto sistemas robotizados basados en movimientos binarios. Estos dispositivos, que pueden denominarse mecanismos digitales, son capaces de realizar movimientos discretos y precisos sin necesidad de sensorizar su comportamiento. Los manipuladores tradicionales poseen un pequeño número de grados de libertad continuos, mientras que un mecanismo digital aproxima este comportamiento usando un número elevado de grados de libertad binarios. Cuanto mayor es el número de grados de libertad menor es el error de posición y orientación. Esto da lugar a mecanismos hiper-redundantes cuyo diseño global se basa, usualmente, en el ensamblado en serie de plataformas paralelas modulares.

Los actuadores binarios tienen únicamente dos estados discretos. En consecuencia, los robots construidos con ellos tienen un número finito de estados en comparación con un manipulador basado en actuadores continuos. Un manipulador binario proporciona buenas prestaciones y es relativamente barato, sin embargo el número de estados crece de forma exponencial con el número de actuadores. Mientras que esto hace que el cálculo de su cinemática inversa sea bastante complejo, su naturaleza discreta hace posible calcular la cinemática directa más eficientemente que en el caso de un manipulador actuado de forma continua, pre-calculando todas las posibles configuraciones de cada módulo. Una ventaja adicional es que el cálculo de la cinemática directa puede hacerse sin el uso repetido de funciones trascendentes de coste computacional muy elevado.

El objetivo de nuestro diseño es disponer de una herramienta que pueda ser utilizada en intervenciones de cirugía mínimamente invasiva (endoscopia, laparoscopia) con el objetivo de actuar como soporte versátil de diferentes tipos de instrumentos que pueden ser utilizados en estas operaciones, por ejemplo cámaras, sistemas de iluminación, pinzas, o instrumentos de captura de imagen médica intra-operativa cómo puede ser un ecógrafo.

En los últimos años ha habido varios intentos de desarrollar herramientas laparoscopias robotizadas para su utilización en intervenciones de cirugía mínimamente invasiva. En [2] se utilizan motores de corriente continua dando lugar a un dispositivo rígido, mientras que el robot médico presentado en [4] se basa en cables para obtener la forma sin que se pueda controlar cada articulación de forma separada. Un concepto distinto se muestra en [10], donde se ha

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

desarrollado un robot tipo serpiente utilizando músculos artificiales mediante polímeros.

En las referencias [8, 16, 17] se describen diversas herramientas médicas desarrolladas utilizando métodos de actuación basados en aleaciones de memoria de forma (SMA) cuyas ventajas son una alta relación energía peso, bajo voltaje de activación y bajo coste. Además, la ausencia de partes en fricción así cómo su pequeño tamaño y peso hacen que las SMAs sean adecuadas para aplicaciones de pequeña escala.

Estos diseños pueden ser mejorados mediante el incremento del número de grados de libertad dando lugar a manipuladores hiper-redundantes, lo cual permite la realización de trayectorias complejas 3D, facilitando evitar obstáculos. La utilización de actuadores binarios en estos dispositivos facilita su modelado y control, dando lugar al concepto de *Binary Hiper Redundant Manipulator* (BHRM), en el que se centra el desarrollo presentado en esta publicación.

El documento está estructurado de la forma siguiente: en el apartado 2 se revisan los antecedentes sobre el problema abordado, en el apartado 3 se describe y formaliza el diseño modular del robot hiper-redundante. En el apartado 4 se plantea un método computacionalmente eficiente para el modelo cinemático directo. Finalmente se presentan las conclusiones y se plantean líneas de trabajo futuro.

2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El concepto de un manipulador consistente en articulaciones actuadas de modo binario, y por lo tanto con un espacio de trabajo discreto, se encuentra en las investigaciones de Pieter sobre un manipulador serie planar digital [14]. Con los desarrollos posteriores en electrónica y computación, el paradigma digital recibió atención adicional. Chirikjian planteó un manipulador binario hiper redundante con un elevado número de grados de libertad y desarrolló un método de diseño óptimo para tareas sencillas de *pick-and-place*. El grupo de este autor en la Universidad John Hopkins ha sido uno de los más activos en el estudio de este tipo de manipuladores. Entre sus resultados se encuentra el estudio de las cinemáticas directa e inversa [5, 11] de manipuladores binarios, y el desarrollo de técnicas eficientes y sofisticadas para la generación de espacios de trabajo bajo determinadas restricciones [6]. Con el objetivo de estimar el estado de todas las articulaciones binarias para alcanzar un determinado objetivo en el espacio de trabajo, este grupo [7] ha desarrollado un método que permite determinar secuencialmente la configuración de un manipulador binario a partir de la base para maximizar la función de densidad del espacio de trabajo discreto.

El uso de BHRMs es una alternativa prometedora al uso de robots tradicionales para ciertas aplicaciones. Un robot hiper redundante puede obtenerse apilando módulos de geometría variable uno encima de otro formando una larga cadena serie. Este planteamiento da lugar a una estructura con buena rigidez y capacidad de carga en comparación con robots tradicionales. El uso de actuadores discretos en vez de continuos aumenta la fiabilidad y reduce el coste del sistema; puesto que los actuadores binarios tienen únicamente dos estados distintos estables, un robot construido con ellos no necesita de realimentación en cada articulación lo que elimina la necesidad de elementos muy costosos como ocurre en los robots convencionales con actuadores continuos

Mientras que los robots con actuadores binarios pueden ser útiles en muchas aplicaciones existe un problema relacionado con su control que es mucho más difícil que el correspondiente problema para un robot con actuadores continuos: el número de posibles configuraciones de un robot binario crece exponencialmente con el número de actuadores. por ejemplo, un robot binario con 30 actuadores tiene 2^30 (aproximadamente 10^9) estados distintos, lo que hace poco práctica la enumeración exhaustiva de todos ellos. El gran número de posibles estados de un manipulador binario hace deseable disponer de algoritmos eficientes para buscar a través de algún subconjunto (potencialmente grande) de las configuraciones del manipulador que satisfagan una restricción concreta, de tal modo qué puede elegirse una configuración óptima. Hay estudios que sugieren que menos de 100 grados de libertad binarios proporcionan la resolución suficiente para muchas tareas prácticas, y que los requisitos de cálculo asociados para resolver su cinemática inversa son razonables. [12]

Entre los esfuerzos más significativos realizados recientemente en torno al desarrollo de BHRMs se encuentran los trabajos de Bayram [1], que describe un HRM accionado mediante cilindros neumáticos todo o nada. La plataforma en el extremo de este robot soporta otro pequeño manipulador de precisión, que es un dispositivo continuo de seis ejes y qué actúa como una herramienta versátil de compensación del error. En otro ámbito de aplicación, Bilton [3] ha propuesto controlar la forma de un concentrador solar utilizando actuadores paralelos binarios implantados en la estructura del espejo.

En el campo de la robótica médica, Mavrommati [13] ha desarrollado un prototipo de herramienta

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

laparoscópica hiper-redundante. El manipulador consiste en una secuencia de módulos accionados mediante cables elaborados con aleaciones con memoria de forma (SMA: *Shape Memory Alloy*), que se comportan como actuadores binarios con dos estados estables. Plante y Dubowsky [15] presentan un manipulador paralelo con actuadores biestables para su aplicación en terapias de cáncer de próstata guiadas por MRI. Su comportamiento elástico garantiza una interacción segura entre el usuario y el robot.

3 DESCRIPCIÓN DEL ROBOT

3.1 ESTRUCTURA Y DISEÑO MODULAR

El prototipo de BHRM que hemos desarrollado esta formado por una secuencia de n módulos idénticos, operados por actuadores binarios. Cada módulo (figura 1) tiene capacidad para incluir cuatro bobinas situadas sobre los ejes fundamentales de la circunferencia, lo que permite obtener tres grados de libertad en cada extremo del módulo. Cada módulo estará unido al siguiente y al anterior mediante un material flexible no elástico, que permite que los módulos interactúen sin apenas resistencia, proporcionando una distancia máxima de alejamiento.

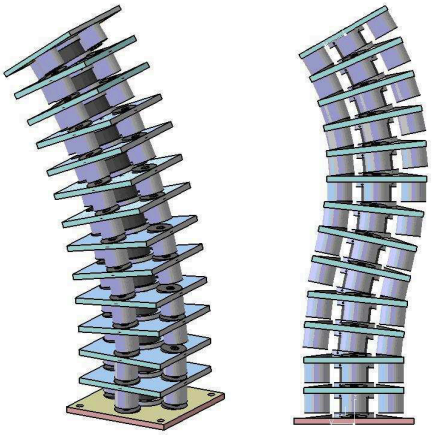


Figura 1: Morfología del BHRM

El movimiento del robot está basado en la interacción electromagnética entre módulos consecutivos, provocando que estos se atraigan o se repelan según el sentido de circulación de las corrientes por las bobinas. El estado de un módulo representa el estado de magnetización de los trapecios circulares que forman el módulo. Estos estados de magnetización son binarios, por lo que los grados de libertad se consiguen con un mecanismo de control "todo/nada" utilizando actuadores binarios. En el caso de robots hiper-redundantes operados por actuadores binarios, con dos estados discretos estables, se puede calcular la cinemática directa de forma más eficiente que para otros actuadores [11-13], pero la cinemática inversa mes más compleja.

Una descripción más detallada del diseño de este BHRM puede encontrarse en [9]. En la figura 2 se pueden ver uno de los módulos del robot y un prototipo de la segunda versión de este BHRM.

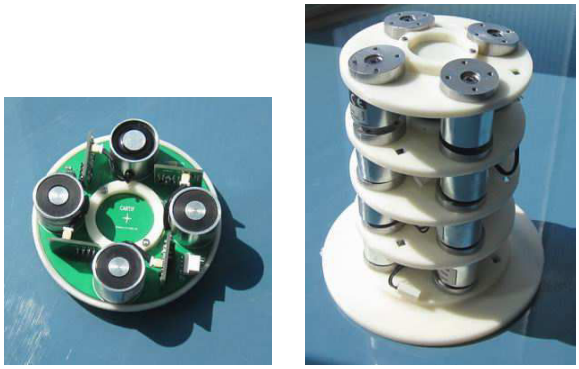


Figura 2: Vista de un módulo y estructura del manipulador apilando módulos idénticos

3.2 FORMALIZACIÓN Y DEFINICIONES PREVIAS

Definiciones:

Manipulador binario: es un manipulador compuesto por un conjunto de módulos con actuadores binarios (de dos estados estables). Los módulos se numeran desde 1 hasta *nm*, comenzando por la base del manipulador.

Cada módulo se define entre dos planos (*i-1* e *i*), de tal manera que el plano *i* corresponde a la parte superior del módulo *i*, y el plano 0 corresponde a la base del manipulador. Si *Ji* define el número de actuadores binarios independientes en el módulo i, entonces existen *2Ji* combinaciones diferentes de estados del actuador binario, aunque, en realidad, algunas de esas combinaciones son inestables y no se consideran.

Estado de un manipulador: denotado por *S*, corresponde a una matriz de números binarios cuyas filas, agrupaciones de *Ji* bits, representan los estados de cada módulo. El estado de un módulo individual, denotado por s_i, es un número binario de *Ji* bits. El número total de bits de *S* es *nm* * *Ji*. También se puede representar el estado de un manipulador por un vector *M* formado por los números, *mi*, en decimal correspondientes a cada uno de los estados s_i de cada módulo del manipulador.

Conjunto de matrices de configuración: Las propiedades cinemáticas de cada módulo se pueden

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

representar mediante una matriz de configuración formada por la matriz de rotación ortogonal (3x3) y el vector de translación entre el centro inferior (plano *i-1*) y el centro superior (plano *i*) del módulo *i*. Para cada módulo, el conjunto de matrices de configuración posibles define todas las posibles orientaciones y posiciones relativas del módulo i respecto al módulo *i-1*. . En el caso que nos ocupa, existen *Ji* = 4 actuadores binarios por módulo, que dan lugar a 2^4 combinaciones, entre las cuales 6 corresponden a estados estables:

- todas los electroimanes en atracción: configuración ***0*** (0 0 0 0).
- dos electroimanes contiguos en atracción y dos en repulsión: configuraciones ***3*** (0 0 1 1), ***6*** (0 1 1 0), ***12*** (1 1 0 0) y ***9*** (1 0 0 1).
- Todos los electroimanes en repulsión: configuración *15* (1 1 1 1).

Por tanto, tendremos un conjunto de 6 matrices de configuración.

4 MODELADO CINEMÁTICO

El análisis cinemático de un robot permite estudiar el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Para el caso que nos ocupa, se ha estudiado el modelo cinemático directo e inverso del robot ápodo hiper-redundante modular considerando un número *n* de módulos. La modularidad permite centrar el diseño en el módulo y no en un robot particular.

El enfoque clásico de modelado y control cinemático de robots no resulta adecuado para nuestro robot. Se consideran las siguientes hipótesis:

1. *n* módulos con 3 grados de libertad por módulo.
2. Control binario(todo/nada) de cada grado de libertad
3. Los grados de libertad sólo podrán variar de forma discreta en el tiempo
4. Se dispondrá de una biblioteca de estados permitidos programados (correspondientes a las configuraciones morfológicas permitidas) y de una lógica de decisión.
5. En la transición de un estado permitido al siguiente, sólo podrá existir variación de uno de los grados de libertad de cada módulo. Esta restricción evita cambios bruscos.
6. Se tomará como origen de referencia el que corresponde al primer anclaje necesario para iniciar la secuencia de desplazamiento.

Para la resolución del problema cinemático directo, se determina la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. Formularemos la cinemática directa usando matrices de transformación homogénea.

Así, la matriz de transformación A_0^M, que describe la posición y orientación del efector final relativo a la base, puede considerarse como el producto de las M transformaciones A_{i-1}^i intermedias de módulo a módulo dentro de la estructura, donde M es el número de módulos intermedios que forman el sistema robótico. Debido a la naturaleza discreta de los dispositivos binarios, cada término de la transformación intermedia A_{i-1}^i puede tener sólo un número finito de valores posibles. Si cada módulo tiene sólo unos pocos grados de libertad binarios, puede enumerarse fácilmente todos los valores de los términos de A_{i-1}^i. En nuestro caso, cada módulo tiene 6 posibles configuraciones o valores para A_{i-1}^i .

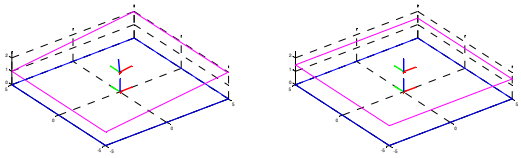


Figura 3: configuraciones de un módulo

En la figura 3 se representan, de izda. a dcha. una de las cuatro configuraciones donde dos pares de electroimanes contiguos están en atracción y los otros en repulsión (configuraciones 3, 6, 12, 9); y la configuración en que todos los electroimanes están en repulsión (configuración 15). El valor de la configuración representa, en binario, el estado de atracción (1) o repulsión (0) de cada par de electroimanes enfrentados. Por ejemplo la configuración 12 en binario sería 1100, por lo que la tercera y cuarta pareja están en atracción y las otras en repulsión.

La función que permite calcular la cinemática directa de un módulo obteniendo su posición y orientación final (P_{fin}) respecto de la inicial (P_{ini}) en función de los parámetros geométricos del módulo (L = anchura, h = altura) y los que definen su configuración (θ (configuración de giro) y α (inclinación)) realiza la siguiente secuencia de operaciones

$$P_{fin} = P_{ini} * \text{translz}(h) * \text{rotz}(\theta) * \text{translz}(tt) * \text{rotx}(\alpha/2) * \text{translz}(tt) * \text{rotx}(\alpha/2) * \text{rotz}(-\theta);$$

siendo $tt = L/2 * \tan(\alpha/2)$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

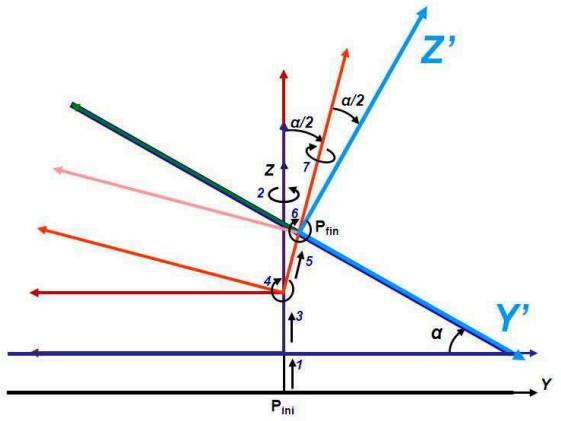


Figura 4: Pasos para el cálculo de la cinemática directa

En las figuras 4 y 5 se representan los pasos a seguir para obtener la configuración 6 (0011) (en azul), que corresponde a una de las configuraciones con dos electroimanes en atracción y dos en repulsión, a partir de la configuración inicial (en negro).

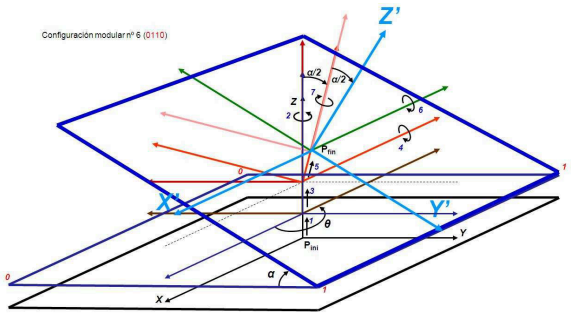


Figura 5: Configuración modular nº 6

Dado que cada módulo se basa en el anterior, podemos obtener la posición y orientación del extremo final a partir de una base dada, calculando el producto de las matrices de transformación, teniendo en cuenta la configuración de cada módulo que constituye el robot. En la figura 6 se muestra un ejemplo de una secuencia formada por 30 módulos, así como un detalle del extremo final, donde se puede observar la posición del extremo final (centro del último cuadro), y su orientación (vector azul).

La cinemática directa se implementa en dos etapas:

- *Etapa de previa*: ejecutada una vez para cada conjunto de parámetros cinemáticos, genera el conjunto de matrices de configuración del manipulador. Se parte de los valores de distancias entre actuadores contiguos y los límites mínimo y máximo de desplazamiento de cada actuador. Teniendo en cuenta las configuraciones estables de cada módulo, se genera la matriz de transformación homogénea correspondiente a cada una de esas configuraciones. Todas ellas forman el conjunto de matrices de configuración.

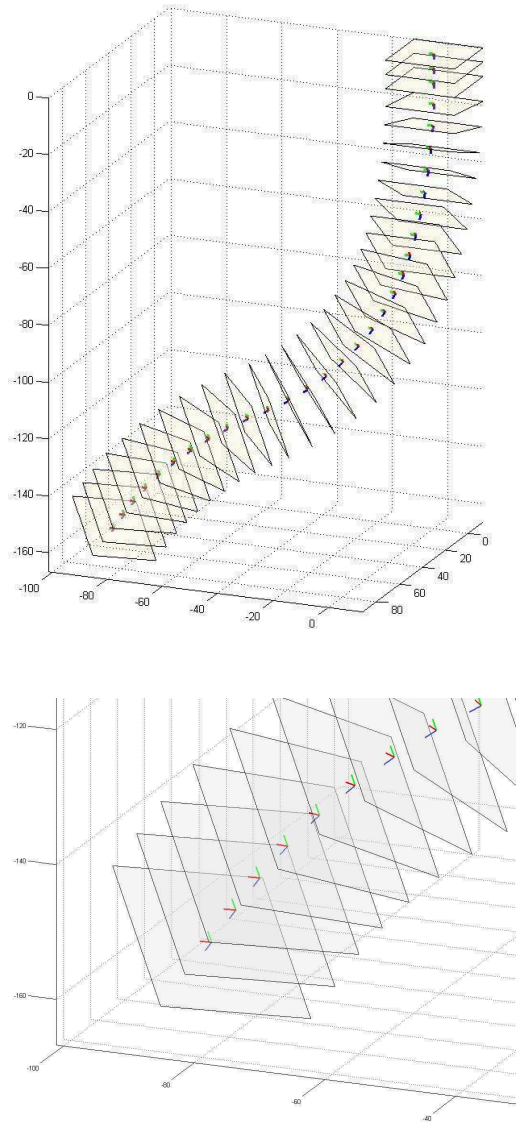


Figura 6: Secuencia de 30 módulos y detalle del extremo final

- *Etapa de computación* de la posición y orientación del efector final teniendo en cuenta la configuración concreta de cada uno de los módulos. Para ello, se parte del vector *M* de estado y se van recorriendo los módulos desde la base hasta el extremo del manipulador, teniendo en cuenta que el extremo de cada módulo sirve de base para el módulo siguiente. El resultado de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la ejecución de esta etapa es la posición y orientación del extremo final del manipulador, referido a su base. El algoritmo correspondiente a esta etapa de computación se ejecuta cada vez que cambia la configuración de alguno de los módulos del manipulador.

5 CONCLUSIONES

Se ha planteado el análisis cinemático directo de un manipulador binario hiper-redundante (BHRM), así como la resolución computacionalmente eficiente de este problema para un dispositivo formado por n módulos idénticos.

Como se ha mostrado en el trabajo, los manipuladores binarios son una alternativa a los tradicionales robots actuados de forma continua. Las ventajas que aportan los robots binarios, tales como bajo coste, poco peso, alta repetitividad y otras, hace que el esfuerzo en su estudio tenga una aplicación práctica con perspectivas de futuro.

Por otra parte, presenta gran interés el desarrollo de nuevos métodos, aplicaciones y prototipos de este tipo de manipuladores, pues su capacidad de moverse en ambientes irregulares y la maniobrabilidad extrema son atractivas para aplicaciones biomédicas. Actualmente estamos desarrollando una segunda versión de un prototipo de BHRM controlable en posición y orientación para realizar tareas en aplicaciones de inspección en entornos de difícil acceso o aplicaciones endoscópicas en la cavidad abdominal. Ese prototipo ha de permitir probar y validar las estrategias de control cinemático presentadas en el presente trabajo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación, en el proyecto DPI2010-21126-C03-03

Referencias

[1] Bayram, A., and M. Kemal Özgören. "The conceptual design of a spatial binary hyper redundant manipulator and its forward kinematics." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 226.1 (2012): 217-227.

[2] Berkelman, P., & Ma, J. (2009). A compact modular teleoperated robotic system for laparoscopic surgery. The International journal of robotics research, 28(9), 1198-1215.

[3] Bilton, A. M., & Dubowsky, S. (2012). Inverse Kinematics for the Control of Hyper-Redundant Binary Mechanisms with Application to Solar Concentrator Mirrors. Latest Advances in Robot Kinematics, 421-428 (2012).

[4] Degani, A., Choset, H., Zubiate, B., Ota, T., & Zenati, M. (2008, August). Highly articulated robotic probe for minimally invasive surgery. In IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE, pp. 3273-3276

[5] Chirikjian, G. S., Kinematic synthesis of mechanisms and robotic manipulators with binary actuators, ASME J. Mech. Design, vol. 117 (1995) 573-580.

[6] Ebert-Uphoff, I. and Chirikjian, G. S., Efficient workspace generation for binary manipulators with many actuators, J. Robotic Systems, vol. 12, no. 6, pp. 383-400, 1995.

[7] Ebert-Uphoff, I. and Chirikjian, G. S., Inverse kinematics of discretely actuated hyperredundant manipulators using workspace densities, in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1996) 139-145.

[8] Giataganas, P., Evangeliou, N., Koveos, Y., Kelasidi, E., & Tzes, A. (2011, June). Design and experimental evaluation of an innovative SMA-based tendon-driven redundant endoscopic robotic surgical tool. In Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on (pp. 1071-1075). IEEE.

[9] González, José L.; Herreros, A.; Fraile Marinero, J.C., Pérez Turiel, J.; de la Fuente, D., Alonso, R.; Gayubo, F., Análisis del Control Cinemática de un Robot Endoscópico Modular Hiper-redundante con Accionamiento Electromagnético, XXXIII Jornadas de Automática, Septiembre 2012

[10] Kornbluh, R., Pelrine, R., Eckerle, J., & Joseph, J. (1998, May). Electrostrictive polymer artificial muscle actuators, 1998. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (Vol. 3, pp. 2147-2154).

[11] Kyatkin, A. B. and Chirikjian, G. S., Synthesis of binary manipulators using the Fourier transform on the Euclidean group, ASME J. Mech. Design, vol. 121 (1999) 9-14.

[12] Lichter, M., Sujan, V. and Dubowsky, S. (2002). Computational issues in the planning and kinematics of binary robots. Proceedings of the 2002 IEEE

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

International Conference on Robotics and Automation , Washington, DC.

[13] Mavrommati, A., Tzorakoleftherakis, E., & Tzes, A. (2012). Design and development of a hyper-redundant binary active laparoscopic manipulator. In IEEE 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), pp. 327-332.

[14] Pieper, D. L., The kinematics of manipulators under computer control, PhD Dissertation, Stanford University, (1968).

[15] Plante J.S. and Dubowsky S. The calibration of a parallel manipulator with binary actuation. In Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design, pp. 391–398. Springer, Dordrecht, 2008.

[16] Sars, V. D., Haliyo, S., & Szewczyk, J. (2010). A practical approach to the design and control of active endoscopes. Mechatronics, 20(2), 251-264.

[17] Szewczyk, J., De Sars, V., Bidaud, P., & Dumont, G. (2001). An active tubular polyarticulated micro-system for flexible endoscope. In Experimental Robotics VII (pp. 179-188). Springer Berlin Heidelberg.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Un método para modelar sistemas no holónomos con rodaduras

Francisco Javier Gil Chica
DFISTS, Universidad de Alicante, gil@disc.ua.es

Manuel Pérez Polo
DFISTS, Universidad de Alicante, manolo@dfists.ua.es

Manuel Pérez Molina
DFISTS, Universidad de Alicante, manuelp@ua.es

Resumen

Se presenta un procedimiento para establecer la condición no holónoma de rodadura e incorporar a la lagrangiana como coordenadas generalizadas las del punto de contacto. El procedimiento es puramente geométrico y evita el concepto de velocidad angular

Palabras clave: Rodadura, no holonomía.

1 Introduction

Es bien conocido que el movimiento general en el plano es una combinación de traslación pura más rotación pura.

En el caso general, el movimiento de rodadura no permite esta separación entre traslación y rotación pura, de manera que la determinación de las restricciones no holónomas ([1],[2],[3],[4],[6]) asociadas con la condición cinemática de rodadura de un cuerpo sobre una superficie arbitraria es un problema digno de considerar. Además, según se establece en [5]: *In general the motion of rolling bodies cannot be calculated using the point of contact as a reference point when setting the rate of change of angular momentum equal to the resulting moment of the forces operating in the laboratory frame of reference.*

En este trabajo mostramos un procedimiento general para calcular la ligadura no holónoma de rodadura, aplicándolo a algunos casos de interés, incluyendo la rodadura de una esfera sobre una superficie arbitraria y de un toro también sobre una superficie arbitaria. Además, mostraremos cómo de forma natural aparecen como coordenadas generalizadas las del punto de contacto, permitiendo escribir en función de éstas la función de Lagrange y por tanto determinar las ecuaciones del movimiento.

Los pasos para determinar las condiciones de rodadura son los siguientes:

1. En el sistema de laboratorio, 'o', definimos $\bar{R}(t)$ como el vector de posición del punto de contacto C.

2. Sea $\bar{r}_i(t)$ el vector de posición del centro de masas (CM) del cuerpo que rueda en un sistema de referencia 'i', paralelo a 'o' y centrado en el punto de contacto.

3. Sea $\bar{r}_s(t)$ el vector de posición de un punto arbitrario de la superficie del cuerpo rodante en un sistema de referencia 's', paralelo al sistema 'o' y cuyo origen está en el CM del cuerpo.

4. Aún definimos un sistema de referencia 'p' cuyo origen coincide con el de 's' y está ligado al cuerpo. Sea $\bar{r}_p(t)$ el vector de posición del punto genérico en la superficie del cuerpo rodante en el sistema de referencia 'p', que se relaciona con $\bar{r}_s(t)$ mediante la matriz de rotación $\mathbf{R}(t)$, de forma que $\bar{r}_s(t) = \mathbf{R}(t)\bar{r}_p(t)$.

5. Llamamos $\bar{r}_o(t)$ al vector de posición en el sistema de laboratorio del punto genérico sobre la superficie del cuerpo, de manera que

$$\begin{aligned} \bar{r}_o(t) &= \bar{R}(t) + \bar{r}_i(t) + \bar{r}_s(t) \\ &= \bar{R}(t) + \bar{r}_i(t) + \mathbf{R}(t)\bar{r}_p(t) \end{aligned} \quad (1)$$

6. Como el vector $\bar{r}_p(t)$ permanece inalterado en el sistema de referencia 'p' ligado al cuerpo, se tiene que $\dot{\bar{r}}_p(t) = 0$, y por tanto, derivando (1) respecto al tiempo, se sigue:

$$\dot{\bar{r}}_o(t) = \dot{\bar{R}}(t) + \dot{\bar{r}}_i(t) + \dot{\mathbf{R}}(t)\bar{r}_p(t) \quad (2)$$

7. Puesto que la ecuación anterior es válida para un punto genérico de la superficie del cuerpo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

rodante, es en particular válida para el punto de contacto C. Asumiendo rodadura sin deslizamiento, el punto C tiene velocidad nula en el sistema 'o', de manera que las condiciones de rodadura se siguen de (2) y son las siguientes:

$$\bar{0} = \dot{\bar{R}}(t) + \dot{\bar{r}}_i(t) + \dot{\mathbf{R}}(t)\bar{r}_p(t) \qquad (3)$$

La ecuación (3) es la expresión matemática de la condición de rodadura sin deslizamiento en el sistema de laboratorio 'o'. Es importante señalar que $\bar{R}(t)$ no debe confundirse con la posición de ningún punto específico del cuerpo, sino que define las coordenadas de laboratorio de los sucesivos puntos de contacto entre el cuerpo rodante y la superficie sobre la que se apoya. Este punto es distinto en cada instante. Por tanto, $\bar{R}(t)$ define, sobre la superficie de apoyo, una trayectoria, y por tanto una velocidad. Pero en cada instante, el punto particular del cuerpo en contacto con esta trayectoria está en reposo en el sistema de laboratorio.

Nuestro procedimiento requiere sólo la matriz de rotación en función de los ángulos de Euler y, como hemos dicho, proporciona una forma para incorporar a la lagrangiana como coordenadas generalizadas las del punto de contacto.

2 Disco rodando en un plano horizontal

Para ilustar el procedimiento de una forma sencilla, consideraremos un disco que rueda sobre un plano, [1], como se muestra en la Figura 1. Por supuesto, este problema sencillo puede encontrarse resuelto en muchos lugares. Nosotros lo traemos aquí a efectos de aclaración del método y también a efectos de comparación. La posición del disco viene dada por las coordenadas (x, y) del punto de contacto y por los ángulos de Euler (p, q, r). Usamos esta notación en lugar de la habitual (φ, θ, ψ) porque es más adecuada para el cálculo simbólico. El ángulo p se define por el eje OX del sistema 'o' y la intersección del plano OXY con el plano que contiene al disco. El ángulo q es el forma por la perpendicular la disco y el eje Z del sistema 'o'. El ángulo r se define por el eje x del sistema 'p' y la línea que pasa por el centro del disco, contenida en el plano del disco y paralela al plano XY del sistema 'o'. En suma, (p, q, r) son los ángulos de Euler que definen la orientación del sistema 'p' respecto al sistema 'o'.

Introducimos dos sistemas de referencia intermediarios cuyos ejes son paralelos a los del sistema de laboratorio 'o'. Uno de ellos, que llamamos 'i', tiene su origen en el punto de contacto; el otro, 's',

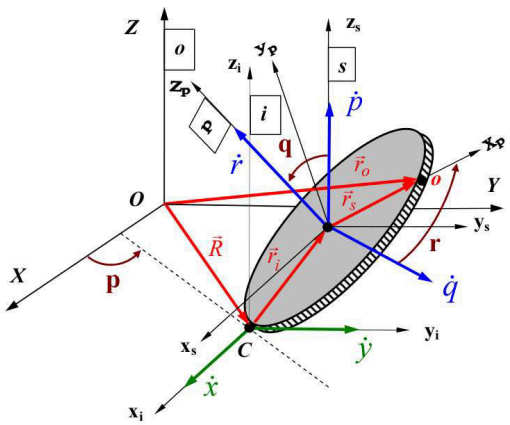


Fig 1: Movimiento general de un disco rodando sobre un plano horizontal; se muestran los sistemas 'o', 'i', 's' y 'p'.

tiene su origen en el centro del disco. La posición de un punto arbitario en la circunferencia del disco está dada por

$$\bar{r}_o = \bar{R} + \bar{r}_i + \bar{r}_s \qquad (4)$$

donde

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

y $\bar{r}_i(t)$ es la posición del centro del disco respecto al sistema 'i'. Si llamamos b al radio del disco:

$$\bar{r}_i = \begin{bmatrix} -b\cos q \sin p \\ b\cos q \cos p \\ b \sin q \end{bmatrix} \qquad (6)$$

Por otro lado, se tiene que $\bar{r}_s = \mathbf{R}_{pqr}\bar{r}_p$, donde (usando la notación de Matlab):

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_{pqr} &= \left[\, \mathbf{R}_{pqr}(:1), \mathbf{R}_{pqr}(:2), \mathbf{R}_{pqr}(:3) \,\right] \\
\mathbf{R}_{pqr}(:1) &= \begin{bmatrix} \cos p \cos r - \sin p \cos q \sin r \\ \sin p \cos r + \cos p \cos q \sin r \\ \sin q \sin r \end{bmatrix} \\
\mathbf{R}_{pqr}(:2) &= \begin{bmatrix} -\cos p \sin r - \sin p \cos q \cos r \\ -\sin p \sin r + \cos p \cos q \cos r \\ \sin q \cos r \end{bmatrix} \\
\mathbf{R}_{pqr}(:3) &= \begin{bmatrix} \sin p \sin q \\ -\cos p \sin q \\ \cos q \end{bmatrix}
\end{aligned} \qquad (7)$$

Si n es el ángulo de posición de un punto genérico

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la circunferencia del disco en el sistema de referencia 'p', se sigue que

$$\bar{r}_p = \begin{bmatrix} b\cos n \\ b\sin n \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Por tanto, la restricción de rodadura se expresa como:

$$\dot{\bar{r}}_o = \bar{0} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\bar{r}_p \tag{9}$$

siendo $n = -r - \pi/2$. El vector $\bar{r}_i$ se escribe como:

$$\dot{\bar{r}}_i = \dot{q}\begin{bmatrix} b\sin q\sin p \\ -b\sin q\cos p \\ b\cos q \end{bmatrix} + \dot{p}\begin{bmatrix} -b\cos q\cos p \\ -b\cos q\sin p \\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

y por otra parte:

$$\dot{\mathbf{R}}_{pqr} = \dot{p}\mathbf{U}_{pqr} + \dot{q}\mathbf{V}_{pqr} + \dot{r}\mathbf{W}_{pqr} \tag{11}$$

donde las matrices $\mathbf{U}_{pqr}, \mathbf{V}_{pqr}, \mathbf{W}_{pqr}$ se calculan fácilmente.

El vector de posición $\bar{r}_p$ del punto de contacto en el sistema 'p' es:

$$\bar{r}_p = \begin{bmatrix} b\cos(-r-\pi/2) \\ b\sin(-r-\pi/2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b\sin r \\ -b\cos r \\ 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

De (6)-(9) junto con $\mathbf{U}_{pqr}$, $\mathbf{V}_{pqr}$ y $\mathbf{W}_{pqr}$ se obtienen las dos ecuaciones de restricción:

$$\begin{aligned} \dot{x} + b\dot{r}\cos p &= 0 \\ \dot{y} + b\dot{r}\sin p &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

Estas son las ligaduras no holónomas que expresan la rodadura del disco sobre la superficie.

3 Esfera que rueda sobre una superficie arbitraria

En esta sección analizamos el problema general de la rodadura de una esfera sobre una superficie cualquiera, expresada como $f(x, y, x) = c$. Se asume que la esfera toca a la superficie en un único punto cada vez, es decir, que la curvatura de la superficie en cualquier dirección es menor que la curvatura de la esfera.

En el sistema de referencia 'i', que es paralelo al sistema 'o' y está centrado en el punto de contacto, las coordenadas del centro de la esfera están dadas por:

$$\bar{r}_i = b\frac{\bar{\nabla}f}{|\bar{\nabla}f|} \tag{14}$$

Por consiguiente, las coordenadas del punto de contacto en 's' son:

$$\bar{r}_s = -b\frac{\bar{\nabla}f}{|\bar{\nabla}f|} \tag{15}$$

mientras que en el sistema 'p' ligado a la esfera:

$$\bar{r}_p = \mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{r}_s \tag{16}$$

La condición de rodadura se obtiene de:

$$\dot{\bar{r}}_o = \bar{0} = \dot{\bar{R}} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{r}_s \tag{17}$$

Calculamos $\dot{\bar{r}}_i$:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{r}}_i &= b\frac{d}{dt}\left\{\frac{\bar{\nabla}f}{|\bar{\nabla}f|}\right\} = \frac{b}{|\bar{\nabla}f|}\frac{d}{dt}(\bar{\nabla}f) \\ &\quad + b\bar{\nabla}f\frac{d}{dt}\left\{\frac{1}{|\bar{\nabla}f|}\right\} \end{aligned} \tag{18}$$

donde

$$\frac{d}{dt}\bar{\nabla}f = \mathbf{H}\dot{\bar{R}} \tag{19}$$

y $\mathbf{H}$ es el Hessiano de f. Por otra parte, se tiene que:

$$\frac{d}{dt}\left\{\frac{1}{|\bar{\nabla}f|}\right\} = -\frac{1}{|\bar{\nabla}f|^3}\dot{\bar{R}}^T\mathbf{H}^T\bar{\nabla}f \tag{20}$$

De las ecuaciones (19)-(20), se sigue:

$$\dot{\bar{r}}_i = \frac{b}{|\bar{\nabla}f|}\mathbf{H}\dot{\bar{R}} - \frac{b}{|\bar{\nabla}f|^3}(\dot{\bar{R}}^T\mathbf{H}^T\bar{\nabla}f)\bar{\nabla}f \tag{21}$$

Como resultado de (15) y (21), la restricción se puede expresar como un conjunto de tres ecuaciones en las tres incógnitas $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$, que a su vez dependen de las tres derivadas respecto al tiempo de los ángulos de Euler:

$$\begin{aligned} \bar{0} &= \left(\mathbf{I} + \frac{b}{|\bar{\nabla}f|}\mathbf{H}\right)\dot{\bar{R}} - \frac{b}{|\bar{\nabla}f|^3}\left(\dot{\bar{R}}^T\mathbf{H}^T\bar{\nabla}f\right)\bar{\nabla}f \\ &\quad - \frac{b}{|\bar{\nabla}f|}\dot{\mathbf{R}}_{pqr}\mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{\nabla}f \end{aligned} \tag{22}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Las ecuaciones (22) se pueden reescribir como un sistema lineal en $\dot{\bar{R}}$. Si llamamos:

$$\bar{E} = \frac{b}{|\bar{\nabla} f|}\dot{\mathbf{R}}_{pqr}\mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{\nabla} f \tag{23}$$

y reordenamos (23):

$$\left[\mathbf{I} + \frac{b}{|\bar{\nabla} f|}\mathbf{H} - \frac{b}{|\bar{\nabla} f|^3}\mathbf{H}^T\bar{\nabla} f\bar{\nabla}^T f\right]\dot{\bar{R}} = \bar{E} \tag{24}$$

Se puede apreciar claramente la naturaleza no holonómica de la ecuacion (24): el sistema lineal es local para cada punto de contacto y esa localidad surge de propiedades locales de la superficie (gradiente y Hessiano).

4 Toro que rueda sobre una superficie arbitraria

Siguiendo un procedimiento similar al de la sección anterior, tratamos el problema de la rodadura de un toro sobre una superficie cualquiera. Asumimos igualmente que el toro toca a la superficie en un sólo punto en cada instante. La circunferencia generatriz del toro tiene radio a. En un momento dado, el punto de contacto pertenece a una particular instancia de la circunferencia generatriz. El centro de esta circunferencia generatriz en el sistema 'i' (paralelo a 'o' y centrado en el punto de contacto) es:

$$a\frac{\bar{\nabla} f}{|\bar{\nabla} f|} \tag{25}$$

Y las coordenadas del centro del toro respecto a 'i' vienen dadas por:

$$\bar{r}_i = a\frac{\bar{\nabla} f}{|\bar{\nabla} f|} + \begin{bmatrix} -b\cos q\sin p \\ b\cos q\cos p \\ b\sin q \end{bmatrix} \tag{26}$$

donde b es la distancia entre el centro del toro y el centro de la circunferencia generatriz. En el sistema 's' (cuyo origen se encuentra en el centro del toro), las coordenadas del punto de contacto son $\bar{r}_s = -\bar{r}_i$.

La restricción de rodadura se puede expresar como $\bar{0} = \dot{\bar{R}} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{r}_s$. Para calcular $\dot{\bar{r}}_i$ a partir de (26) podemos aprovechar los cálculos de la sección anterior. En particular, tomando derivadas en ambos miembros de (26), la derivada del primer término a la derecha es idéntico a (21) con la única diferencia de escribir a en lugar de b, mientras que la derivada del segundo término a la derecha es simplemente (10), que puede escribirse de forma compacta como $\dot{p}\bar{u} + \dot{q}\bar{v}$. Como el segundo término depende sólo de los ángulos de Euler, la solución formal para el toro es la misma que para la esfera:

$$\bar{E} = \frac{a}{|\bar{\nabla} f|}\dot{\mathbf{R}}_{pqr}\mathbf{R}_{pqr}^{-1}\bar{\nabla} f + \dot{p}\bar{u} + \dot{q}\bar{v} \tag{27}$$

Las mismas consideraciones que se hicieron respecto a (24) valen para (27).

5 Energía cinética del toro

Como se dijo arriba, la principal ventaja del método que presentamos es que, de forma natural, las coordenadas del punto de contacto aparecen como coordenadas generalizadas de la lagrangiana. Para ilustrar este punto, consideremos la energía cinética del toro que rueda sobre un plano. La distribución de masa se limita a la superficie y es uniforme.

En primer lugar, la superficie del toro es $4\pi^2 ab$, y la densidad superficial de masa $\sigma = M/4\pi^2 ab$, siendo M la masa total del toro. El elemento de superficie es $a(b + a\cos m)dmdn$, donde n es el ángulo de posición de la circunferencia generatriz que contiene al punto genérico, y m el ángulo de posición sobre la circunferencia generatriz de dicho punto. Por tanto, el elemento de masa $d\nu = \sigma a(b + a\cos m)dmdn$. La posición de este elemento de masa es $\bar{r}_o = \bar{R} + \bar{r}_i + \mathbf{R}_{pqr}\bar{r}_p$ y su velocidad $\dot{\bar{r}}_o = \dot{\bar{R}} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\bar{r}_p$, donde:

$$\dot{\bar{r}}_i = \dot{p}\begin{bmatrix} -b\cos q\cos p \\ -b\cos q\sin p \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{q}\begin{bmatrix} b\sin q\sin p \\ -b\sin q\cos p \\ b\cos q \end{bmatrix} \tag{28}$$

y

$$\bar{r}_p = \begin{bmatrix} (b + a\cos m)\cos n \\ (b + a\cos m)\sin n \\ a\sin m \end{bmatrix} \tag{29}$$

La energía cinética de un elemento de masa es por tanto

$$dT = \frac{1}{2}\sigma\dot{\bar{r}}_o^2 a(b + a\cos m)dmdn \tag{30}$$

y la energía cinética total se obtiene por integración de (30) respecto a m y n. La integración es laboriosa, puesto que aparecen nueve términos al desarrollar el cuadrado de la velocidad:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\dot{\bar{r}}_o^2 = (\dot{\bar{R}} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\bar{r}_p)^T(\dot{\bar{R}} + \dot{\bar{r}}_i + \dot{\mathbf{R}}_{pqr}\bar{r}_p) \quad (31)$$

y para cada uno de los T_i en (31) es necesario calcular:

$$\int dm \int dn \frac{1}{2}\sigma a(b + a\cos m)T_i \quad (32)$$

El resultado es:

$$\begin{aligned} T \;=\; & \frac{1}{2}M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \\ & + Mb(\dot{x}\dot{q}\sin p\sin q - \dot{p}\dot{y}\sin p\cos q \\ & - \dot{p}\dot{x}\cos p\cos q - \dot{q}\dot{y}\cos p\sin q) \\ & + \dot{p}^2\left\{\left[\frac{1}{2}Mb^2 + \frac{1}{8}M(a^2+2b^2)\right]\cos^2 q\right\} \\ & + \dot{p}^2\left\{\frac{1}{8}M(5a^2+2b^2)\right\} \\ & + \dot{q}^2\left\{\frac{1}{2}Mb^2 + \frac{1}{8}M(5a^2+2b^2)\right\} \\ & + \dot{r}^2\left\{\frac{1}{4}M(3a^2+2b^2)\right\} \\ & + \dot{p}\dot{r}\left\{\frac{1}{2}M(3a^2+2b^2)\cos q\right\} \end{aligned} \quad (33)$$

A partir de aquí se sigue el procedimiento habitual, calculando la energía potencial para formar la lagrangiana e introduciendo los multiplicadores de Lagrange, que sabemos que se identifican con las fuerzas de ligadura. Sin embargo, no es nuestra intención resolver el problema dinámico, sino mostrar cómo obtener la ligadura de rodar y cómo aparecen, como coordenadas generalizadas, las del punto de contacto.

6 Conclusiones

Hemos presentado un procedimiento por el cual, introduciendo una serie de sistemas de referencia intermedios, podemos obtener las condiciones de rodadura sin deslizamiento. El procedimiento es geométrico y evita el uso del vector velocidad angular. Una ventaja es que, siendo la velocidad angular un concepto fácil de visualizar cuando un sólido gira alrededor de un eje, no lo es en el caso más general de rotación de un sólido libre, o con un punto fijo, como es el caso en que existe rodadura.

Es un procedimiento claro y explícito que muestra la generalidad de las ecuaciones de Lagrange (estrictamente, no sería preciso un capítulo específico sobre rotación, tal y como aparece en todos los textos consultados). Finalmente, introduce de forma sencilla las coordenadas del punto de contacto como coordenadas generalizadas.

El procedimiento puede extenderse a superficies en movimiento, simplemente estableciendo que la velocidad del punto de contacto es igual a la velocidad en el sistema de laboratorio del punto de la superficie móvil al que toca el sólido en cada momento, por ejemplo, el problema de la rodadura sobre una plataforma giratoria tal y como se muestra en [7] y [8].

Referencias

[1] L. A. Pars, "A treatise on analytical dynamics", Ox Bow Press, 1979.

[2] H. Cabannes, "Cours de Mécanique Générale", Dunod, 1966.

[3] E. T. Whittaker, "A treatise on the analytical dynamics of particles and rigid bodies", Cambridge University Press, 1917.

[4] Ju. I. Neimark, N. A. Fufaev, "Dynamics of Nonholonomic Systems". American Mathematical Society, 1972.

[5] Jens Hoejgaard Jensen, "Rules for rolling as a rotation about the instantaneous point of contact", Eur. J. Phys. 32 (2011) 389 – 397

[6] Puyun Gao, "To derive equations of nonholonomic systems without using the Chetaev conditions", Mechanical Research Communications, 32, 2005, 255 – 264.

[7] Robert Ehrlich and Jaroslaw Tuszynski, "Ball on a rotating turntable: Comparison of theory and experiment", Am. J. Phys. **63** (4), April 1995

[8] Joel Gersten, Harry Soodak, "Ball moving on stationary or rotating horizontal surface", Am. J. Phys. **60**, 43, 1992

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PENDULO MOLAR. APLICACIÓN A LA ESTABILIZACIÓN DE SISTEMAS OSCILATORIOS

Manuel Pérez Molina, Manuel F. Pérez Polo, Javier Gil Chica
Departamento de Física Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior. Apartado 99, E-03080. Alicante. E-mail: ma_perez_m@hotmail.com manolo@dfists.ua.es; gil@dfists.ua.es

Resumen

En este trabajo se estudia el movimiento horizontal de una masa sometida a una fuerza horizontal variable de la que cuelga un péndulo formado por un cable inextensible y de masa despreciable unido a una gran masa. El modelo matemático del sistema se obtiene de las ecuaciones de Newton, y a partir de él se demuestra que cuando no hay fuerza horizontal aplicada a la masa de la que está suspendido péndulo, los pequeños movimientos del mismo alrededor de la posición natural de equilibrio son inestables debido a la aparición de una bifurcación inestable del tipo Hopf. El sistema se aplica para estudiar cómo es posible amortiguar el movimiento de la masa de la que cuelga el péndulo cuando a ésta se le aplica una fuerza armónica que aproxima a las fuerzas que pueden aparecer en un seísmo.

Palabras clave: Péndulo molar, sistema vibrante, estabilidad, bifurcación de Hopf, excitación armónica

1 INTRODUCCIÓN

Los problemas asociados a la estabilidad y el comportamiento dinámico de un péndulo sometido a vibraciones en el punto de suspensión pueden considerarse emblemáticos en muchos campos de la ingeniería [8], [9], [2], [3]. La obtención de soluciones analíticas en este tipo de problemas generalmente sólo es posible bajo hipótesis simplificadoras. Un ejemplo típico es el bien conocido péndulo invertido, que ha sido estudiado bajo diferentes hipótesis en diversos trabajos [4], [6], [7]. En este trabajo se presenta un modelo simple pero con suficiente precisión para predecir el comportamiento del llamado péndulo molar, el cual consiste en un péndulo del que cuelga una masa muy grande que permite estabilizar otra masa a la que va unido. A partir del modelo matemático y tomando cero la fuerza que actúa sobre la masa de la que cuelga el péndulo, se demuestra que las pequeñas oscilaciones del péndulo alrededor de la posición de equilibrio son siempre inestables debido a la aparición de una bifurcación inestable del tipo Hopf [5], [10]. Este análisis permite asimismo obtener la frecuencia de autooscilación del sistema. Finalmente se llevan a cabo simulaciones numéricas en las que por un lado se corrobora el valor de la frecuencia de autooscilación y por otro lado se demuestra la estabilización del conocido péndulo molar instalado en el edificio de Taipei 101 [1].

2 MODELO DEL SISTEMA

La figura 1 muestra un esquema del sistema con los diagramas de las distintas fuerzas que actúan por separado sobre las masas m_1 y m_2, descomponiendo tales fuerzas en sus componentes horizontales y verticales. Para simplificar la notación se introduce la masa total $m = m_1 + m_2$. Llamando T a la tensión de la cuerda y aplicando la segunda ley de Newton en la dirección del eje OX para las masas m_1 y m_2 se obtiene que:

$$m_1\ddot{x}_1 = T\text{sen}\theta + F \qquad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -T\text{sen}\theta \qquad (2)$$

Análogamente, aplicando la segunda ley de Newton en la dirección del eje OY para la masa m_2 se obtiene que:

$$m_2\ddot{y}_2 = T\cos\theta - m_2 g \qquad (3)$$

En las ecuaciones (1)-(3) tenemos cinco incógnitas: x_1, x_2, y_2, T y la fuerza aplicada F. Si tenemos en cuenta las relaciones geométricas indicadas en la figura 1, derivando dos veces respecto del tiempo la posición horizontal x_2 del péndulo se obtiene que:

$$\ddot{x}_2 = \ddot{x}_1 + R\ddot{\theta}\cos\theta - R\dot{\theta}^2\text{sen}\theta \qquad (4)$$

$$\ddot{y}_2 = R\ddot{\theta}\text{sen}\theta + R\dot{\theta}^2\cos\theta \qquad (5)$$

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Eliminando la tensión T de la cuerda entre las ecuaciones (1)-(5) se deduce que:

$$m\ddot{x}_1 + m_2 R\ddot{\theta}\cos\theta - m_2 R\dot{\theta}^2 \operatorname{sen}\theta = F \qquad (6)$$

Con el fin de simplificar la notación introducimos la variable auxiliar u dada por:

$$\begin{aligned} u &= m_2 R\operatorname{sen}\theta \\ \ddot{u} &= m_2 R\ddot{\theta}\cos\theta - m_2 R\dot{\theta}^2\operatorname{sen}\theta \end{aligned} \qquad (7)$$

Eliminando $\ddot{x}_1$ de la ecuación (6) a través de las ecuaciones (1)-(5) y teniendo en cuenta las relaciones de la ecuación (7) se obtiene el modelo matemático del sistema expresado en función del desplazamiento x_1, la masa m_1, del ángulo de giro θ del péndulo y la variable auxiliar u, es decir:

$$\left[m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta\right]\ddot{\theta} + \frac{m_2\operatorname{sen}(2\theta)}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{mg\operatorname{sen}\theta + F\cos\theta}{R} = 0 \qquad (8)$$

$$T = m_2 R\left[\ddot{\theta}\tan\theta + \dot{\theta}^2\right] + \frac{m_2 g}{\cos\theta} \qquad (10)$$

Por otro lado, la posición horizontal x_1 de la masa 1 se puede expresar en función del ángulo θ y de la fuerza F integrando dos veces en la ecuación (9) y teniendo en cuenta la definición de u dada en la ecuación (7), lo que permite deducir que:

$$x_1 = -\frac{m_2 R\operatorname{sen}\theta}{m} + \left(\frac{m_2 R\dot{\theta}_0\cos\theta_0}{m} + \dot{x}_{1,0}\right)t + \frac{m_2 R\operatorname{sen}\theta_0}{m} + x_{1,0} + \frac{G}{m} \qquad (11)$$

donde θ_0, $x_{1,0}$, $\dot{\theta}_0$ y $\dot{x}_{1,0}$ son las condiciones iniciales para x_1 y θ así como para sus respectivas derivadas en $t=0$ dadas por:

$$\theta_0 = \theta(t=0) \quad \text{y} \quad \dot{\theta}_0 = \dot{\theta}(t=0)$$
$$x_{1,0} = x_1(t=0) \quad\quad \dot{x}_{1,0} = \dot{x}_1(t=0) \qquad (12)$$

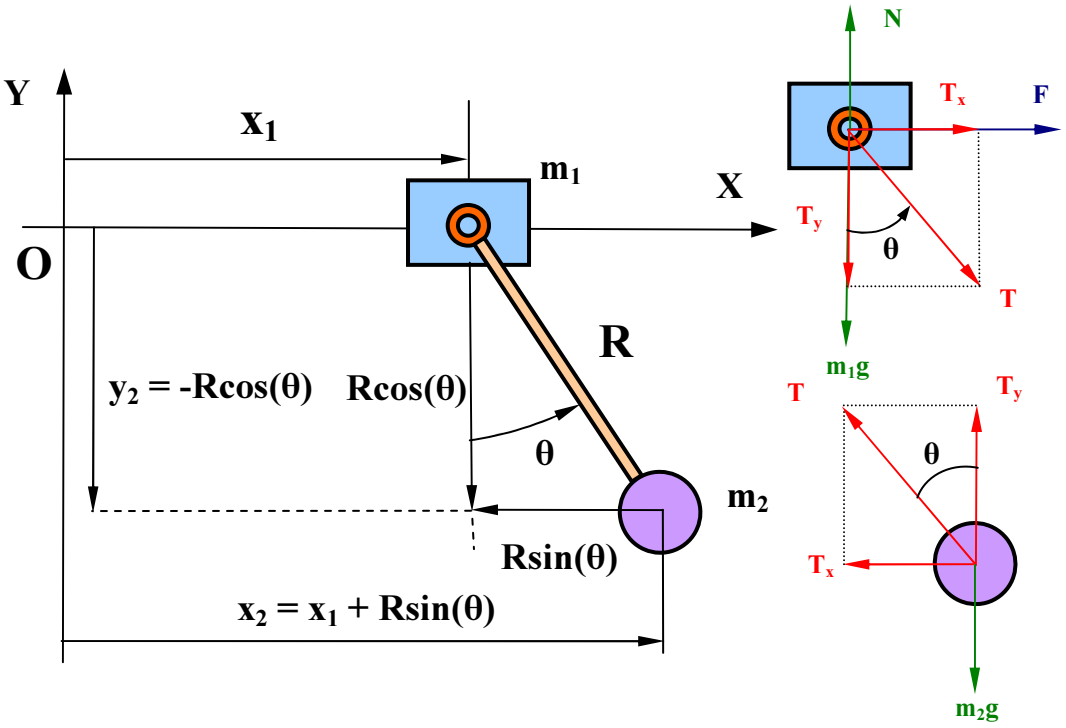


Figura 1: Esquema del sistema y diagrama de fuerzas que actúan sobre las masas m_1 y m_2 por separado

$$m\ddot{x}_1 + \ddot{u} = F \qquad (9)$$

Por un lado, al sustituir la ecuación (5) en la ecuación (3) se obtiene la tensión T de la cuerda en función del ángulo θ como:

mientras que G es la doble integral de la fuerza F (como función del tiempo) dada por:

$$G(t) = \int_0^t \left(\int_0^\tau F(x)dx\right)d\tau \qquad (13)$$

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para analizar el comportamiento dinámico del sistema se introducen las variables de estado θ_1 y θ_2 definidas como:

$$\theta_1 = \theta \;;\; \theta_2 = \dot{\theta} \tag{14}$$

De las ecuaciones (8) y (14) se deduce que:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 &= -\frac{m_2 \operatorname{sen}(2\theta_1)}{2\left[m_1 + m_2 \operatorname{sen}^2\theta_1\right]}\theta_2^2 - \\ &-\frac{mg\operatorname{sen}\theta_1 + F\cos\theta_1}{R\left[m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta_1\right]} \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Y a partir de las variables de estado definidas en la ecuación (14), la ecuación (10) de la tensión T del cable se puede escribir de la forma:

$$\begin{aligned} T = &-\frac{m_2^2 R\operatorname{sen}^2\theta_1}{\left[m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta_1\right]}\theta_2^2 \\ &-\frac{m_2 mg\operatorname{sen}^2\theta_1}{\left[m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta_1\right]\cos\theta_1} \\ &-\frac{m_2 RF\operatorname{sen}\theta_1}{R\left[m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta_1\right]} \\ &+ m_2 R\theta_2^2 + \frac{m_2 g}{\cos\theta_1} \end{aligned} \tag{16}$$

De este modo, el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la ecuación (15) se resolverá numéricamente y la solución obtenida permitirá hallar el ángulo $\theta = \theta_1$, la posición horizontal x_1 de la masa m_1 y la tensión T de la cuerda mediante las ecuaciones (11)-(14) y (16).

3 ANALISIS DE LOS PEQUEÑOS MOVIMIENTOS SIN FUERZAS HORIZONTALES

En esta sección vamos a demostrar que los pequeños movimientos alrededor de la posición natural de equilibrio del péndulo ($\theta \approx 0$) tomando $F = 0$ son siempre inestables debido a la aparición de una bifurcación inestable del tipo Hopf (dos autovalores complejos conjugados puros) en el punto de equilibrio. Según las ecuaciones (15), tomando $F = 0$ se deduce que los puntos de equilibrio del sistema vienen dados por:

$$\begin{gathered} P_1(\theta_1,\theta_2) = (0,0) \;;\; P_2(\theta_1,\theta_2) = (\pi,0) \\ P_3(\theta_1,\theta_2) = (-\pi,0) \end{gathered} \tag{17}$$

A partir del Jacobiano del sistema dado las ecuaciones (15) es fácil comprobar que los puntos P_2 y P_3 son sillas inestables, mientras que el Jacobiano en el punto P_1 tiene un par de autovalores complejos conjugados puros dados por:

$$\left[\lambda I - J_{P_1}\right] = \lambda^2 - \frac{mg}{m_1 R} \Rightarrow \lambda_{1,2} = \pm j\frac{mg}{m_1 R} \tag{18}$$

y por tanto aparece una bifurcación del tipo Hopf. La estabilidad de esta bifurcación depende del signo del primer valor de Lyapunov [5], [10], el cual necesario calcular ya que actualmente no existe ningún otro procedimiento que permita saber con certeza si un punto de equilibrio con autovalores complejos conjugados puros es estable o inestable. Para el cálculo del primer valor de Lyapunov se considera que los ángulos θ_1 y θ_2 (ecuación (14)) son muy pequeños, y por tanto en las ecuaciones (15) se pueden hacer las siguientes aproximaciones hasta términos de tercer orden:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}\theta_1 &\approx \theta_1 - \frac{1}{3!}\theta_1^3 \\ \operatorname{sen}(2\theta_1) &\approx 2\theta_1 - \frac{8}{3!}\theta_1^3 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\frac{1}{m_1 + m_2\operatorname{sen}^2\theta_1} \approx \frac{1}{m_1} - \frac{m_2}{m_1^2}\operatorname{sen}^2\theta_1 + \frac{m_2^2}{m_1^3}\operatorname{sen}^4\theta_1 \tag{20}$$

Con las aproximaciones (19) y (20) las ecuaciones (15) se pueden escribir de la forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\dfrac{mg}{m_1 R} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta_1 \\ \theta_2\end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ C_1\theta_1^3 + C_2\theta_1\theta_2^2 \end{bmatrix} + \mathrm{O}\left(\|\theta\|^4\right) \end{aligned} \tag{21}$$

donde las constantes C_1 y C_2 vienen dadas por:

$$C_1 = \frac{mg}{m_1 R}\left(\frac{1}{3!} + \frac{m_2}{m_1}\right) \;;\; C_2 = -\frac{m_2}{m_1} \tag{22}$$

Obsérvese que los autovalores de la parte lineal de la ecuación (21) vienen dados por la ecuación (18). A continuación se calcula la matriz de semejanza P que lleva al sistema (21) a la forma canónica de control. Para ello se determina el autovector correspondiente a uno

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de los autovalores dados por la ecuación (18), es decir:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} = i\omega\begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} \Rightarrow x_{11} = 1;\ x_{12} = i\omega$$
$$x_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} i + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};\ \omega^2 = \frac{mg}{m_1 R} \Rightarrow P = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Consideremos ahora el cambio de variable dado por:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \Rightarrow \theta_1 = y;\ \theta_2 = \omega x \quad (24)$$

Sustituyendo la ecuación (24) en las ecuaciones (21) se obtiene que:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 y^3 + C_2 \omega^2 x^2 y \end{bmatrix} + \mathrm{O}\left(\|x\|^4\right) \quad (25)$$

Despreciando el resto de cuarto orden, la ecuación (25) se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f^1(x,y) \\ f^2(x,y) \end{bmatrix} \quad (26)$$
$$f^1(x,y) = 0\ ;\ f^2(x,y) = C_1 y^3 + C_2 \omega^2 x^2 y$$

A partir de la ecuación (26) el primer valor de Lyapunov se puede expresar como [5], [10]:

$$L_1 = \frac{1}{16}\left[f^1_{xxx} + f^1_{xyy} + f^2_{xxy} + f^2_{yyy} \right] + \\ \frac{1}{16\omega}\begin{bmatrix} f^1_{xy}\left(f^1_{xx} + f^1_{yy}\right) - f^2_{xy}\left(f^2_{xx} + f^2_{yy}\right) \\ - f^1_{xx} f^2_{xx} + f^1_{yy} f^2_{yy} \end{bmatrix} \quad (27)$$

donde los subíndices en la ecuación (27) indican derivadas parciales particularizadas en el punto de equilibrio P_1(x = 0, y = 0). De las ecuaciones (26) y (27) se deduce que el primer valor de Lyapunov L_1 viene dado por:

$$L_1 = \frac{1}{16}\left(C_1 + C_2\omega^2\right) = \frac{1}{3!16}\frac{m_1}{m_2}\omega^2 > 0 \quad (28)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (28), el primer valor de Lyapunov L_1 es siempre positivo, lo que indica que el punto de equilibrio P_1 es incondicionalmente inestable. Finalmente, cabe señalar que la frecuencia de autooscilación ω_a puede determinarse en virtud de la ecuación (18) como:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{mg}{m_1 R}} \quad (29)$$

Con el fin de corroborar numéricamente los resultados de esta sección, vamos a considerar los parámetros del péndulo molar instalado en el edificio Taipei 101 [1]. Como la masa de la bola es de 660 toneladas y la longitud del cable es de 11.5 metros, consideraremos los siguientes parámetros del sistema:

$$m_1 = 305810 \text{ kg} \\ m_2 = 660000 \text{ kg} \\ R = 11.5 \text{ m} \quad (30)$$

Asimismo, consideraremos una perturbación inicial que durará sólo un breve período de tiempo inicial para posteriormente desaparecer por completo, la cual vendrá dada por:

$$F(t) = \begin{cases} F_m sen(2\pi ft) & \text{si } 0 \le t \le T \\ 0 \text{ si } t < 0 \ \text{ o si } t > T \end{cases} \quad (31)$$

donde los parámetros de la ecuación (31) vienen dados por:

$$F_m = 314.43 \text{ kN};\ f = 0.15 \text{ Hz};\ T = f^{-1} = 6.6 \text{ s} \quad (32)$$

Sustituyendo en la ecuación (13) la expresión de la fuerza $F(t)$ dada en la ecuación (31) se obtiene que una función $G(t)$ dada por:

$$G(t) = \begin{cases} 0 \text{ si } t < 0 \\ \dfrac{F_m\left[2\pi ft - sen(2\pi ft)\right]}{(2\pi f)^2} \text{ si } 0 \le t \le T \\ \dfrac{F_m T^2}{2\pi} \text{ si } t > T \end{cases} \quad (33)$$

De la ecuación (33) se deduce que la función $G(t)$ se estabiliza a un valor constante a partir de $t = T$ y por tanto se trata de una función acotada. Teniendo en cuenta esto último junto con la ecuación (11), la condición general para que el movimiento de la masa m_1 esté acotado se puede expresar en función de las conidiciones iniciales para x_1 y θ como:

$$\frac{m_2 R\dot{\theta}_0 \cos\theta_0}{m} + \dot{x}_{1,0} = 0 \quad (34)$$

Con el fin de que se cumpla la condición establecida en la ecuación (34), en este caso

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

consideraremos que los valores para las condiciones iniciales dadas en la ecuación (12) vienen dados por:

$$\theta_0 = 0 \text{ rad} \qquad \dot{\theta}_0 = 0 \text{ rad/s}$$
$$x_{1,0} = -\frac{G(T)}{m} = -2.3 \text{ m} \quad \text{y} \quad \dot{x}_{1,0} = 0 \text{ m/s} \qquad (35)$$

donde la condición inicial para x_1 (en $t = 0$) se ha elegido a fin de cancelar el término constante al que se estabiliza $G(t)$ para que el movimiento de la masa m_1 quede además centrado alrededor del origen. La figura 2 muestra los resultados obtenidos para la simulación de la ecuación (15) con los parámetros de las ecuaciones (30)-(35).

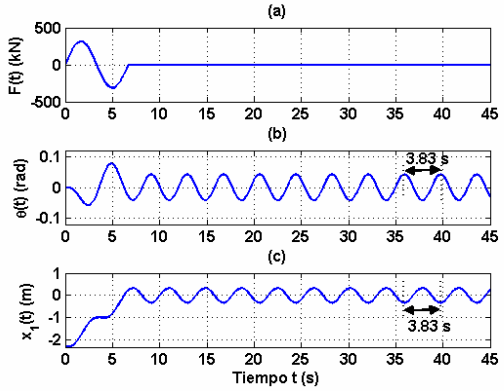


Figura 2. (a) Fuerza de horizontal $F(t)$ aplicada sobre la masa m_1. Comportamiento autoscilante del péndulo con período $T = 3.83$ s para: (b) el ángulo $\theta(t)$ que forma el péndulo con la vertical y (c) la posición horizontal $x_1(t)$ de la masa m_1.

La figura 2 (a) muestra la perturbación que actúa sobre la masa m_1 dada en la ecuación (31). Por otro lado, la figuras 2 (b) y (c) muestran los comportamientos autoscilantes del péndulo así como de la masa m_1, los cuales se mantienen una vez que ha cesado la fuerza ($F(t) = 0$ para $t>T$). Puede observarse que el período de la oscilación es $T = 3.83$ s, para el que la frecuencia lineal es $T^{-1} = 0.261$ Hz y la frecuencia angular es $2\pi T^{-1} = 1.64$ rad/s. Este valor es exactamente el mismo que el que se obtiene al sustituir los parámetros de la ecuación (30) en la ecuación (29). Cabe finalmente señalar que a la vista de las figuras 2 (b) y (c) puede observarse que para desplazamientos positivos de la masa m_1 el ángulo θ toma valores negativos y viceversa, lo que viene a indicar que *la masa m_1 oscila en oposición de fase respecto a la masa m_2 del péndulo*. Este hecho proporciona una primera idea preliminar del comportamiento del péndulo como amortiguador de las oscilaciones de la masa m_1 (tal y como vamos a discutir en la siguiente sección).

Para concluir esta sección, la figura 3 muestra la representación de la variable de estado $\theta_2(t)$ frente a la variable de estado $\theta_1(t)$. Dicha representación se ha obtenido resolviendo numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales dado en la ecuación (15) mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden para $0 \le t \le 800$ s asumiendo los parámetros de las ecuaciones (31), (32) y (35). La presencia de única trayectoria cerrada en el plano de fases corrobora que efectivamente el sistema presenta un comportamiento periódico, tal y como cabía esperar.

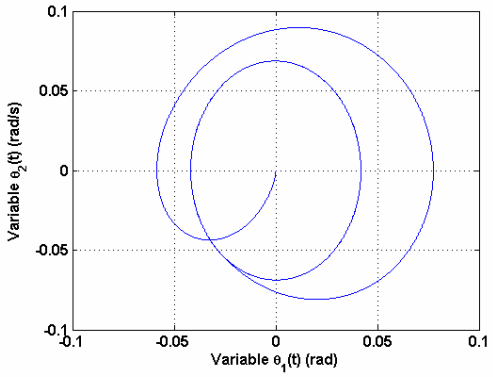


Figura 3: Representación del plano de fases de $\theta_2(t)$ frente a $\theta_1(t)$ para el sistema dinámico descrito en la ecuación (15) bajo las condiciones de las ecuaciones (31), (32) y (35).

4 PÉNDULO MOLAR APLICADO AL AMORTIGUAMIENTO DE VIBRACIONES ARMÓNICAS

Una vez analizado el comportamiento del péndulo en ausencia de fuerzas horizontales sobre la masa m_1 -es decir con $F = 0$-, en esta sección se plantea el caso particular en el que la fuerza de excitación F es armónica de la forma:

$$F(t) = F_m \text{sen}(\omega t + \phi) \qquad (36)$$

donde F_m es la amplitud de la fuerza (o fuerza máxima), ω es la frecuencia angular y ϕ es la fase inicial en $t = 0$. Al sustituir la fuerza armónica de la ecuación (36) en la ecuación (31) se obtiene que la función G viene ahora dada por:

$$G(t) = \frac{F_m[2\pi ft\cos\phi + \text{sen}\phi - \text{sen}(\omega t + \phi)]}{(2\pi f)^2} \qquad (37)$$

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Teniendo en cuenta las ecuaciones (11) y (37), la condición general para que el movimiento de la masa m_1 esté acotado se puede expresar ahora como:

$$\frac{F_m \cos\phi}{2\pi fm} + \frac{m_2 R\dot{\theta}_0 \cos\theta_0}{m} + \dot{x}_{1,0} = 0 \qquad (38)$$

Con el fin de llevar a cabo las simulaciones numéricas consideraremos los mismos valores de los parámetros que en la ecuación (32) salvo por la fase ϕ, para la que se considerará el valor dado por:

$$\phi = 0 \text{ rad} \qquad (39)$$

Y para que se cumpla la condición establecida en la ecuación (38) (movimiento acotado de la masa m_1), los valores para las condiciones iniciales de la ecuación (12) se eligen ahora como:

$$\theta_0 = 0 \text{ rad} \quad \dot{\theta}_0 = 0 \text{ rad/s} \quad \text{y} \quad x_{1,0} = 0 \text{ m} \quad \dot{x}_{1,0} = -0.345 \text{ m/s} \qquad (40)$$

donde el valor para la condición inicial de la velocidad horizontal (derivada de x_1 respecto al tiempo) de la masa m_1 en $t = 0$ se ha obtenido despejando $\dot{x}_{1,0}$ de la ecuación (38) teniendo en cuenta el resto de parámetros indicados en la ecuación (40).

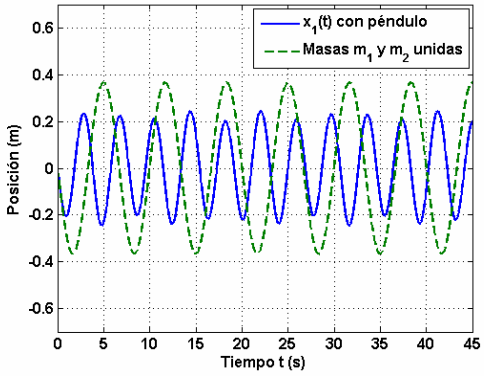


Figura 4: Comparación de la posición horizontal $x_1(t)$ de la masa m_1 unida al péndulo (trazo continuo) con la posición que habrían tenido las masas m_1 y m_2 unidas actuando sobre ellas las misma fuerza (trazo discontinuo).

La figura 4 muestra la posición horizontal x_1 de la masa m_1 en comparación con la posición horizontal que habría tenido la masa total $m = m_1 + m_2$ (masas m_1 y m_2 unidas solidariamente) si sobre ellas hubiera actuado la misma fuerza horizontal indicada en la ecuación (36). Mientras que la amplitud de las oscilaciones con la masa m_1 unida al péndulo está alrededor de los 0.24 m, las oscilaciones que habrían experimentado las masas m_1 y m_2 unidas entre sí bajo la misma fuerza de la ecuación (36) tienen una amplitud de unos 0.37 m. Esto supone una reducción de más del 34 % de la amplitud de las oscilaciones con el péndulo, lo que demuestra claramente el efecto amortiguador del péndulo a la frecuencia de 0.15 Hz (ecuación (32)), que además es la frecuencia del modo fundamental de resonancia del edifcio Taipei 101 [1].

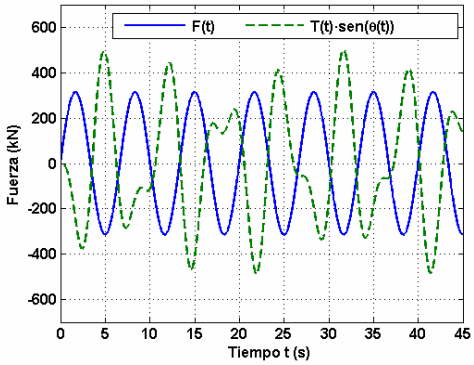


Figura 5: Fuerza horizontal $F(t)$ aplicada sobre la masa m_1 (trazo continuo) y componente horizontal de la tensión dada por $T(t)\text{sen}(\theta(t))$ (trazo discontinuo).

La figura 5 muestra la componente horizontal $T(t)\text{sen}\theta(t)$ de la tensión de la cuerda junto con la fuerza horizontal $F(t)$ aplicada sobre la masa m_1 dada en la ecuación (36). Tal y como puede observarse, cuando la componente horizontal de la tensión es positiva (va hacia la derecha) la fuerza F es negativa (va hacia la izquierda) y viceversa. Esto demuestra que la cuerda tiende a tirar de la masa m_1 en sentido contrario al de la fuerza horizontal aplicada, lo que concuerda plenamente con el hecho de que el péndulo tiende a amortiguar las oscilaciones en la masa m_1.

Para finalizar esta sección, la figura 6 muestra la representación gráfica de θ_2 frente a θ_1 (plano de fases). Dicha representación se ha obtenido resolviendo numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales dado en la ecuación (15) mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden para $0 \le t \le 800$ s asumiendo los parámetros de las ecuaciones (36)-(40). Al contrario que en el caso del sistema autoscilante considerado en el apartado anterior (figura 3), la ausencia de una trayectoria cerrada en el plano de fases deja patente que el sistema no tiene un comportamiento periódico.

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

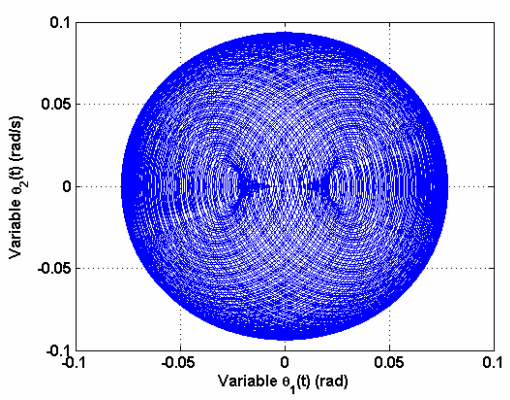


Figura 6: Representación del plano de fases de $\theta_2(t)$ frente a $\theta_1(t)$ para el sistema dinámico descrito en la ecuación (15) bajo las condiciones de las ecuaciones (36)-(40).

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha modelado un sistema mecánico consistente en una masa sometida a fuerzas horizontales de la que cuelga un péndulo inextensible de masa despreciable unido a una gran masa. En primer lugar se han analizado los pequeños movimientos de la masa que cuelga del péndulo en ausencia de fuerzas horizontales. Con este fin se han obtenido analíticamente los puntos de equilibrio del sistema demostrándose que la posición natural de equilibrio es inestable debido a la aparición de una bifurcación inestable Hopf. Este análisis ha permitido demostrar que en ausencia de fuerzas horizontales el sistema puede alcanzar un régimen autoscilante, con una frecuencia de autoscilación que también se ha determinado analíticamente en función de los parámetros del sistema. Se ha realizado una primera simulación numérica asumiendo parámetros característicos del amortiguador de masa del edificio Taipei 101, en la que una fuerza de excitación horizontal de breve duración ha conducido al sistema al régimen autooscilante. En dicha simulación se ha podido comprobar la coincidencia total entre la frecuencia de autoscilación obtenida numéricamente con la predicha analíticamente. Finalmente se ha realizado otra simulación numérica asumiendo una fuerza horizontal sinusoidal continuamente aplicada sobre la masa de la que cuelga el péndulo. En este caso se ha podido comprobar que el sistema amortigua considerablemente las oscilaciones de la masa de la que cuelga el péndulo, cuyas oscilaciones tienen una amplitud muy inferior a la que habrían tenido las dos masas juntas (del péndulo y de la que cuelga el péndulo) si sobre ellas hubiera actuado la misma fuerza horizontal. Por último, la representación del plano de fases del sistema ha permitido demostrar que a diferencia del caso del comportamiento autoscilante antes indicado, en este caso el sistema no tiene un comportamiento periódico.

Referencias

[1] Chen, K., Wang, J., Huang, B., Lui, C., Huang, W., (2012) "Vibrations of the TAIPEI 101 skycraper caused by the 2011 Tohoku earthquake, Japan". Earth Planets Space, **64**, pp. 1277-1286.

[2] Fidlin, A., (2006) Nonlinear Oscillations in Mechanical Engineering, Springer, New York.

[3] Fidlin A., (2008) Thomsen, J. J. Non-trivial effects of high-frequency excitation for strongly damped mechanical systems, Int. J. Non-Linear Mechanics, **43**, pp. 569-578.

[4] Furuta, K., Yamasita, M., Kobayashi, S., (1992) Swing-up control of inverted pendulum using pseudo-state feedback. J. Sys. Control Eng. **206**, pp. 263-269.

[5] Guckenheimer, J., Holmes, P., (1983) Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Springer Verlag, New York.

[6] Perez-Polo, M. F., Perez-Molina, M., Gil J., (2012) Swing-up and positioning control of an inverted wheeled cart pendulum system with chaotic balancing motions. International Journal of Non-Linear Mechanics. **47**, pp. 655-665.

[7] Perez-Polo, M. F., Perez-Molina, M., Gil, J., Berná, J. A., (2014) Stability and chaotic behavior of a PID controlled inverted pendulum subjected to harmonic base excitations by using the normal form theory, Applied Math. and Comp. **232**, pp. 698-718.

[8] Thomsen J. J., (2003) Vibrations and Stability: Advanced Theory, Analysis and Tools, second Ed., Springer, Berlin, Heidelberg.

[9] Thomsen J. J., (2005) Slow high-frequency effects in mechanics: problems, solutions, potentials, Int. J. Bifurcation Chaos, **15**, pp. 2799–2818.

[10] Wiggins, S., (1990) Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, second Ed., Springer Verlag, New York.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MEJORA DEL RENDIMIENTO DE UN REACTOR CONTINUO EN REGIMEN OSCILANTE GENERADO POR CONTROL PI

Manuel F. Pérez Polo, Manuel Pérez Molina, Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano
Departamento de Física Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior. Apartado 99, E-03080. Alicante. E-mail: manolo@dfists.ua.es; ; ma_perez_m@hotmail.com ; gil@dfists.ua.es ; jberna@dfists.ua.es

Resumen

En este trabajo se presenta un reactor continuo tipo tanque agitado y refrigerado por camisa (RTCA) donde se da una reacción exotérmica de pseudo primer orden para producir un producto de gran valor comercial como es el propilen glicol. El reactor está controlado por dos reguladores PI que manipulan el caudal de salida del reactor y el caudal de fluido refrigerante. El modelo del reactor se obtiene partir de los balances de materia y energía, que al particularizarlos en estado estacionario sin control y con control, permiten dar una justificación del esquema de control propuesto, el cual se utiliza para generar oscilaciones en la temperatura y composición del reactor. Se demuestra que el valor medio de la conversión de los productos reaccionantes en régimen oscilatorio puede hacerse superior al correspondiente valor en estado estacionario obtenido sin oscilación. Este tipo de comportamiento es imposible de alcanzar sin un sistema de control, por lo que el trabajo presenta un ejemplo de cómo, aún con un sistema de control simple como el PI, es posible bien controlar el reactor en un punto de consigna dado o mejorar el rendimiento de la reacción en régimen oscilante. Una explicación cualitativa de los efectos considerados es analizada en base lo al intercambio de calor entre el fluido refrigerante de la camisa y los productos de reacción contenidos en el reactor.

Palabras clave: Reactor continuo agitado, regulador PI, curvas calor generado eliminado, rendimiento, oscilación.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de reactores continuos agitados en los que se da una reacción irreversible ya sea de primer orden o de pseudo primer orden de la forma $A + B \rightarrow C$ (B es un inerte o conjunto de inertes en exceso necesario para que se produzca la reacción) es de gran importancia práctica en la industria de procesos. Este tipo de reacciones aparece en muchos procesos de hidrólisis, tal como en la producción de propilen glicol (C) a partir de óxido de propileno (A) en presencia de un inerte formado por una mezcla de agua acidulada más metanol (B) [2]. En ambientes industriales y de laboratorio se ha comprobado que en este tipo de reactores puede aparecer comportamiento auto-oscilante. El análisis de bifurcaciones para reactores RTCA revela que estos sistemas tienen una gran complejidad, mostrando que es posible la aparición de comportamiento regular y auto-oscilante [3], [4], [8]. Así, varios trabajos han demostrado que un reactor RTCA puede dar lugar a un régimen oscilante que aún puede derivar en caótico, perturbando periódicamente el caudal de fluido refrigerante [3], [4], [5], [7], [8]. Por los motivos citados, el control de este tipo de equipos no se ha considerado hasta recientemente. De hecho, estas unidades se diseñaban para funcionar en las proximidades del punto de equilibrio deseado, teniendo en cuenta las propiedades de auto-regulación del sistema para eliminar perturbaciones [3], [8]. Sin embargo, actualmente, se está imponiendo el uso de sistemas de control cada vez más sofisticados, que tengan la posibilidad de hacer que el sistema funcione de alguna forma predeterminada no convencional, tal como en régimen de oscilación para producir un ciclo límite [1], [7], [9].

En este trabajo se justifica la necesidad de dos reguladores PI para conseguir un régimen oscilatorio que permite aumentar la conversión media de la reacción para obtener propilen glicol. El modelo del proceso está basado en balances de materia y energía que por conveniencia de manipulación de las ecuaciones y de interpretación de los resultados obtenidos se han escrito en forma adimensional [1], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. A partir del análisis en estado estacionario de las curvas de calor generado y eliminado se demuestra bajo que condiciones el sistema de control estabiliza al reactor en un punto de equilibrio, que sin control es inestable. A continuación se analizan como varían los autovalores del sistema linealizado en el punto de equilibrio para que aparezca una órbita tipo Shilnikov [4], [5], [8], [11] que da lugar a la aparición de ciclos límite con valores medios de conversión que pueden ser más altos que los correspondientes obtenidos en estado estacionario

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 MODELO DEL REACTOR

En la figura 1 se muestra un esquema de un reactor RTCA con un sistema de control convencional con dos reguladores PI [1], [4], [5]. El modelo matemático del sistema se obtiene considerando una reacción de pseudo primer orden de la forma: $A + B + M \rightarrow C$. El modelo del reactor se obtiene a partir de los siguientes balances:

Balance de masa de los reactantes A, B, C y M

$$\frac{dV}{dt} = F_0 - F \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{dt} &= \frac{F_0}{V}(C_{A0} - C_A) - k \cdot C_A \\ \frac{dC_B}{dt} &= \frac{F_0}{V}(C_{B0} - C_B) - k \cdot C_A \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_C}{dt} &= \frac{F_0}{V}(-C_C) + kC_A \\ \frac{dC_M}{dt} &= \frac{F_0}{V}(C_{M0} - C_M) \end{aligned} \tag{3}$$

$$k = \alpha \cdot e^{-E/R \cdot T} \tag{4}$$

Siendo V el volumen del reactor, F_0 y F los caudales de entrada y salida, C_A, C_B, C_C, C_M y C_{A0}, C_{B0} y C_{M0} son las composiciones de A, B, C y M en kmol /m^3 en el reactor y la corriente de entrada respectivamente, suponiendo que no existe componente de C en la corriente de entrada. Teniendo en cuenta que el inerte B y M están en exceso, las velocidades de reacción en la ecuación (1) se pueden aproximar de la forma:

$$r_A = r_B = -r_C \approx kC_A \;;\; k = \alpha \cdot e^{-E/RT} \tag{5}$$

Siendo E la energía de activación y α la constante pre-exponencial de acuerdo con la ley de Arrhenius. F_0 es el caudal volumétrico en la corriente de entrada que viene dado por:

$$F_0 = \frac{F_{A0}}{\rho_{A0}} + \frac{F_{B0}}{\rho_{B0}} + \frac{F_{M0}}{\rho_{M0}} \tag{6}$$

En donde F_{A0}, F_{B0}, F_{M0} son los caudales molares en la corriente de entrada en kmol/h y $\rho_{A0}, \rho_{B0}, \rho_{M0}$ son las densidades molares de los componentes puros *A, B, M*. Las concentraciones en la corriente de entrada en las ecuaciones (1), (2) y (3) se determinan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$C_{A0} = \frac{F_{A0}}{F_0} \;;\; C_{B0} = \frac{F_{B0}}{F_0} \;;\; C_{M0} = \frac{F_{M0}}{F_0} \tag{7}$$

El balance de energía en el reactor viene dado por la ecuación

$$\begin{aligned} Vc_{pr}\frac{dT}{dt} &= F_{A0}c_{ps}(T_0 - T) + (-\Delta H_R)\alpha \cdot C_A V e^{-E/RT} \\ &\quad - UA(T - T_j) \end{aligned} \tag{8}$$

Siendo ($-\Delta H_r$) la entalpía de reacción, U es el coeficiente global de transmisión de calor en la camisa, A es el área de transmisión de calor, T_j es la temperatura del fluido refrigerante en la camisa y T_0 la temperatura de la corriente de entrada. Los parámetros c_{pr}, c_{ps} vienen definidos por las ecuaciones:

$$c_{pr} = c_{pA}C_A + c_{pB}C_B + c_{pC}C_C + c_{pM}C_M \tag{9}$$

$$c_{ps} = c_{pA} + \frac{F_{mB0}}{F_{mA0}}c_{pB} + \frac{F_{mM0}}{F_{mA0}}c_{pM} \tag{10}$$

Siendo $c_{pA}, c_{pB}, c_{pM}, c_{pC}$ los calores específicos molares para *A, B, M* y *C*, respectivamente [6]. El balance de energía en la camisa (figura 1) viene dado por:

$$\rho_j c_{pj} V_j \frac{dT_j}{dt} = \rho_j c_{pj} F_j (T_{jo} - T_j) + UA(T - T_j) \tag{11}$$

En donde F_j es el caudal volumétrico c_{pj} es el calor específico del fluido refrigerante (kJ/kg K), ρ_j es la densidad (kg/m^3), y T_{j0} es la temperatura (K). El conjunto de ecuaciones anteriores representan el modelo del sistema sin control.

El sistema de control está formado por dos reguladores PI que manipulan el caudal de salida F y el de fluido refrigerante F_j. Las ecuaciones de los reguladores viene n dadas por:

$$F(t) = F_s + K_v\left[\left(V(t) - V_s\right) + \frac{1}{t_1}\int_0^t \left(V(\sigma) - V_s\right)d\sigma\right] \tag{12}$$

$$F_j(t) = F_{js} + K_t\left[\left(T(t) - T_{set}\right) + \frac{1}{t_2}\int_0^t \left(T(\sigma) - T_{set}\right)d\sigma\right] \tag{13}$$

siendo F_s y F_{js} los valores de estado estacionario del caudal de salida y del fluido refrigerante, V_s es el volumen del reactor en estado estacionario, T_{set} es la temperatura de consigna, K_v y K_t son las constantes de acción proporcional y t_1, t_2 son los tiempos de reset de las respectivas acciones

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

integrales (figura 1). Introduciendo las siguientes variables adimensionales:

$$\tau=\frac{F_{0s}t}{V_s}\ ;\ x_1=\frac{V}{V_s}\ ;\ x_{2a}=\frac{C_A}{C'_{A0}}\ ;\ x_{2a0}=\frac{C_{A0}}{C'_{A0}};\ x_{2b}=\frac{C_B}{C'_{B0}}$$
$$x_{2b0}=\frac{C_{B0}}{C'_{B0}}\ ;\ x_{2c}=\frac{C_C}{C'_{C0}}\ ;\ x_{2m}=\frac{C_M}{C'_{M0}}\ ;\ x_{2m0}=\frac{C_{M0}}{C'_{M0}}$$
$$\frac{1}{x_3}=\frac{E}{RT}\ ;\ \frac{1}{x_{30}}=\frac{E}{RT_0}\ ;\ \frac{1}{x_4}=\frac{E}{RT_j}\ ;\ \frac{1}{x_{40}}=\frac{E}{RT_{j0}}$$
$$\frac{1}{x_{set}}=\frac{E}{RT_{set}}\ ;\ x_5=\frac{F}{F_{0s}}\ ;\ x_{50}=\frac{F_0}{F_{0s}}\ ;\ x_6=\frac{F_j}{F_{js}}$$

(14)

en donde las concentraciones marcadas con prima indican valores iniciales de las concentraciones de los reactantes en el reactor, que se tomarán como valores de referencia para definir las variables dadas por la ecuaciones (14) y (16).

El parámetro c_y, que depende de las variables absolutas C_A, C_B, C_C, C_M y de las variables adimensionales x_{2a}, x_{2b}, x_{2c}, x_{2m} definidas en la ecuación (14), se define en la ecuación (17).

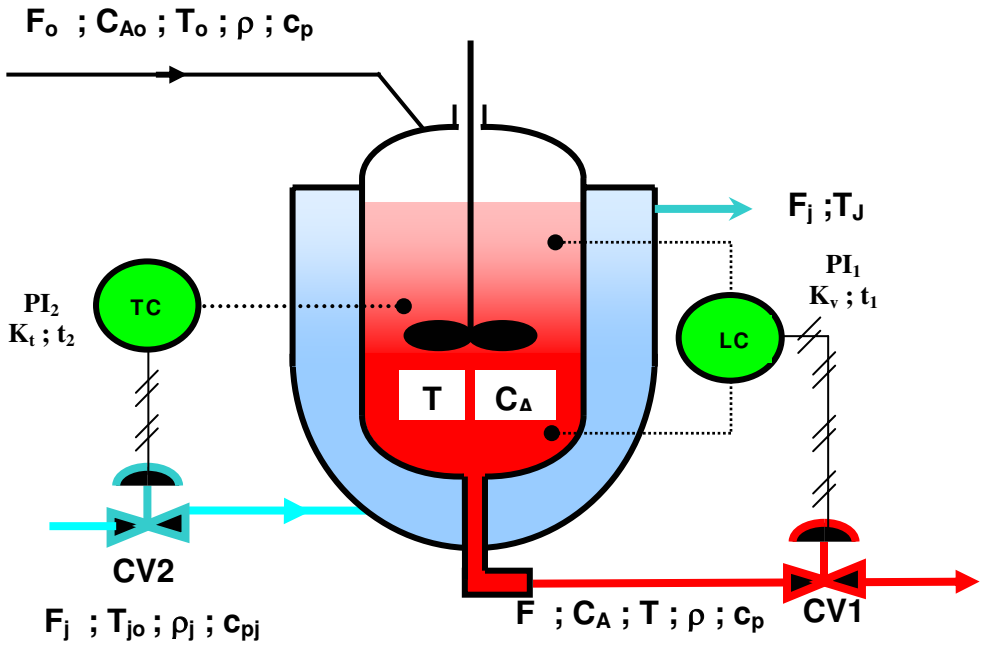


Figura 1: Reactor con control convencional con dos reguladores PI

donde F_{0s} es el valor de estado estacionario para el caudal de entrada y C'_{A0}, C'_{B0}, C'_{C0}, C'_{M0} son concentraciones de referencia en estado estacionario obtenidas después de arrancar el reactor. Las constantes adimensionales de los reguladores PI vienen dadas por:

$$K_{vd}=K_v\frac{V_s}{F_{0s}}\ ;\ t_{1d}=t_1\frac{F_{0s}}{V_s}$$
$$K_{td}=K_t\frac{T_0}{F_{js}}\ ;\ t_{2d}=t_2\frac{F_{0s}}{V_s} \qquad (15)$$

Introduciendo los parámetros definidos de la forma:

$$\left.\begin{aligned} c_0&=\frac{V_s\alpha}{F_{0s}}\ ;\ c_{01}=\frac{V_s\alpha}{F_{0s}}\frac{C'_{A0}}{C'_{B0}}\ ;\ c_{02}=\frac{V_s\alpha}{F_{0s}}\frac{C'_{A0}}{C'_{C0}}\\ c_1&=\frac{V_sR(-\Delta H_R)C'_{A0}}{F_{0s}Ec_{ps}}\alpha\\ c_2&=\frac{UA}{F_{A0}c_{ps}}\ ;\ c_3=\frac{V_sF_{js}}{V_jF_{0s}}\ ;\ c_4=\frac{UAV_s}{\rho_jc_{pj}V_jF_{0s}} \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

$$c_y=\frac{F_0}{F_{A0}c_{PS}}\left\{\begin{matrix} c_{PA}C'_{A0}x_{2a}+c_{PB}C'_{B0}x_{2b}+\\ c_{PC}C'_{C0}x_{2c}+c_{PM}C'_{M0}x_{2m}\end{matrix}\right\} \qquad (17)$$

Las ecuaciones (18) definen el modelo del reactor con los dos controladores PI definidos en las ecuaciones (12) y (13) y serán utilizadas en este trabajo, a pesar de que son difíciles de manejar, tanto por su número como por la complejidad de las no linealidades. Modelos simplificados del reactor en el que se reduce el número de ecuaciones se pueden encontrar en [1], [7].

Es interesante destacar que la ecuación octava y novena son debidas a los reguladores PI que manipulan el caudal de salida y el caudal de fluido refrigerante respectivamente. Por otro lado, se observa que es posible eliminar el volumen adimensional en función del caudal adimensional de salida o viceversa, utilizando la ecuación primera y octava, que son lineales, tal como se analizará en el apartado siguiente.

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dx_1}{d\tau} &= x_{50} - x_5 \\
\frac{dx_{2a}}{d\tau} &= \frac{x_{50}}{x_1}(x_{2a0} - x_{2a}) - c_0 x_{2a} \exp\left(-1/x_3\right) \\
\frac{dx_{2b}}{d\tau} &= \frac{x_{50}}{x_1}(x_{2b0} - x_{2b}) - c_{01} x_{2a} \exp\left(-1/x_3\right) \\
\frac{dx_{2c}}{d\tau} &= -\frac{x_{50}}{x_1} x_{2c} + c_{02} x_{2a} \exp\left(-1/x_3\right) \\
\frac{dx_{2m}}{d\tau} &= \frac{x_{50}}{x_1}(x_{2mo} - x_{2m}) \\
c_y \frac{dx_3}{d\tau} &= \frac{1}{x_1}(x_{30} - x_3) + c_1 x_{2a} \exp\left(-1/x_3\right) - \frac{c_2}{x_1}(x_3 - x_4) \\
\frac{dx_4}{d\tau} &= c_3 x_6 (x_{40} - x_4) + c_4 (x_3 - x_4) \\
\frac{dx_5}{d\tau} &= K_{vd}(x_{50} - x_5) + \frac{K_{vd}}{t_{1d}}(x_1 - 1) \\
\frac{dx_6}{d\tau} &= \frac{K_{td}}{x_{30}}\left(\frac{dx_3}{d\tau} + \frac{1}{t_{2d}}(x_3 - x_{set})\right)
\end{aligned}\right\} \quad (18)$$

3 ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL

Empleando argumentos basados en el comportamiento del reactor en estado estacionario se va a demostrar la necesidad del sistema de control formado por los dos reguladores PI_1 y PI_2 de la figura 1.

Primero se analiza el regulador PI_1, para ello, eliminando x_5 entre la primera y octava ecuación de las (18) se deduce que:

$$\frac{d^2 x_1(\tau)}{d\tau^2} + K_{vd}\frac{dx_1(\tau)}{d\tau} + \frac{K_{vd}}{t_{1d}} x_1(\tau) = \frac{K_{vd}}{t_{1d}} \quad (19)$$

Suponiendo condiciones iniciales nulas y que se verifica la desigualdad: $K_{vd}/t_{1d} > (K_{vd}/2)^2$, la solución de la ecuación (19) viene dada por:

$$x_1(\tau) = 1 - \frac{\exp\left(\frac{-K_{vd}}{2}\right)\tau}{\sqrt{1 - \left(\frac{K_{vd} t_{1d}}{2}\right)^2}} \sin\left[\sqrt{\frac{K_{vd}}{t_{1d}}}\sqrt{1 - \left(\frac{K_{vd} t_{1d}}{2}\right)^2}\,\tau + ar\cos\sqrt{\frac{K_{vd} t_{1d}}{4}}\right] \quad (20)$$

A partir de la ecuación (20) se deduce que el volumen del reactor está siempre bajo control debido a la acción del regulador PI_1, ya que las perturbaciones en el caudal de entrada se eliminan cuando $\tau \to \infty$ de forma que el volumen inicial del reactor siempre se alcanza.

Suponiendo que $K_d = 0$ y $t_{2d} = \infty$ (o sea que el regulador PI_2 no está en operación), asumiendo estado estacionario de las ecuaciones (18) se deduce que:

$$\left.\begin{aligned}
0 &= x_{50} - x_5^* \ ; \\
0 &= \frac{x_{50}}{x_1^*}(x_{2a0} - x_{2a}^*) - c_0 x_{2a}^* \exp\left(-1/x_3^*\right) \\
0 &= \frac{x_{50}}{x_1^*}(x_{2b0} - x_{2b}^*) - c_{01} x_{2a}^* x \exp\left(-1/x_3^*\right) \\
0 &= -\frac{x_{50}}{x_1^*} x_{2c}^* + c_{02} x_{2a}^* \exp\left(-1/x_3^*\right) \\
0 &= \frac{x_{50}}{x_1^*}(x_{2mo} - x_{2m}^*) \\
0 &= \frac{1}{x_1^*}(x_{30} - x_3^*) + c_1 x_{2a}^* \exp\left(-1/x_3^*\right) - \frac{c_2}{x_1^*}(x_3^* - x_4^*) \\
0 &= c_3 x_6^* (x_{40} - x_4^*) + c_4 (x_3^* - x_4^*) \\
0 &= K_{vd}(x_{50} - x_5^*) + \frac{K_{vd}}{t_{1d}}(x_1^* - 1)
\end{aligned}\right\} \quad (21)$$

en donde los valores marcados con asterisco indican estado estacionario. De las ecuaciones (21) se deduce que:

$$x_{2a}^* = \frac{x_{50} x_{2a0}}{x_{50} + c_0 \exp\left(-1/x_3^*\right)} \ ; \ x_5^* = x_{50} \ ; \ x_1^* = 1 \quad (22)$$

$$(x_{30} - x_3^*) + c_1 x_{2a}^* \exp\left(-1/x_3^*\right) - c_2 (x_3^* - x_4^*) = 0 \quad (23)$$

$$c_3 x_6^* (x_{40} - x_4^*) + c_4 (x_3^* - x_4^*) = 0 \quad (24)$$

Hay que resaltar que cuando las variables de equilibrio x^*_{2a}, x^*_3, x^*_4 y x^*_6 son conocidas la composición de equilibrio de los componentes inertes x^*_{2b}, x^*_{2m} y la concentración de equilibrio del propilen glicol x^*_{2c} están determinadas. Eliminando x^*_4 entre las ecuaciones (23) y (24) y sustituyendo x^*_{2a} a partir de la ecuación (22) se deduce que:

$$(x_{30} - x_3^*) + \frac{c_1 x_{50} x_{2a0} \exp\left(-1/x_3^*\right)}{x_{50} + c_0 \exp\left(-1/x_3^*\right)} - \frac{c_2 c_3 x_6^* (x_3^* - x_{40})}{c_3 x_6^* + c_4} = 0 \quad (25)$$

que se puede escribir de la forma:

$$\frac{c_1 x_{50} x_{2a0} \exp\left(-1/x_3^*\right)}{x_{50} + c_0 \exp\left(-1/x_3^*\right)} = \left(1 + \frac{c_2 c_3 x_6^*}{c_3 x_6^* + c_4}\right) x_3^* - \left(x_{30} + \frac{c_2 c_3 x_6^* x_{40}}{c_3 x_6^* + c_4}\right) \quad (26)$$

la ecuación (26) se puede interpretar de la siguiente manera: El término izquierdo se puede interpretar como el calor generado por la reacción, mientras que el derecho asociado a las corrientes de entrada y salida es el calor eliminado Por consiguiente la ecuación (26) representa el balance de energía del reactor en estado estacionario, suponiendo que no hay control. Introduciendo la nomenclatura

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

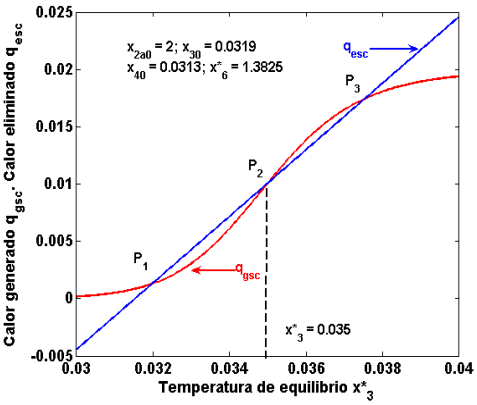


Figura 2: Curvas de calor generado y eliminado sin control

$$q_{gsc}\left(x_3^*\right)=\frac{c_1 x_{50} x_{2a0}\exp\left(-1/x_3^*\right)}{x_{50}+c_0\exp\left(-1/x_3^*\right)}$$

$$q_{esc}\left(x_3^*\right)=\left(1+\frac{c_2 c_3 x_6^*}{c_3 x_6^*+c_4}\right)x_3^*-\left(x_{30}+\frac{c_2 c_3 x_6^* x_{40}}{c_3 x_6^*+c_4}\right)$$

(27)

en donde los subíndices "gsc" y "esc" denotan calor generado y eliminado sin control respectivamente. En la figura 2 se trazan las curvas de calor generado eliminado para los valores de parámetros indicados. Se observa que q_{gsc} tiene forma de sigmoide, mientras que q_{esc} es una línea recta. Por consiguiente, sin el regulador PI_2 y dependiendo del valor adimensional del caudal de refrigerante x^*_6 es posible obtener uno, dos o tres estados estacionarios dependiendo del número de puntos de corte.

En la figura 2, la línea recta del calor eliminado s ha trazado para cortar a la curva de calor generado exactamente en el valor $x^*_3 = 0.035$, lo que da $x^*_6 = 1.3825$ y por tanto se obtienen tres puntos de equilibrio P_1, P_2 y P_3. El punto P_2 es siempre inestable, ya que una pequeño aumento de temperatura da lugar a que la curva q_{gsc} esté por encima de la q_{esc} y por tanto la temperatura seguirá aumentando sin límite. De igual forma se puede comprobar que si la temperatura de P_2 disminuye no es posible mantener el reactor en dicho punto. Un razonamiento permite afirmar que P_1 siempre es estable. Sin embargo el mismo razonamiento cualitativo no es válido para el punto P_3 que puede ser estable o inestable [3], [4], [5]. La forma cuantitativa de determinar la estabilidad o no de P_1, P_2 y P_3 consiste en calcular los autovalores del sistema linealizado en dichos puntos. Si todos los autovalores de las correspondiente matriz jacobiana tienen parte real negativa el reactor será estable; pero si al menos un autovalor tiene parte real positiva el reactor será inestable en dicho punto. Se puede demostrar que en el punto P_2 siempre existe un autovalor con parte real positiva. Por consiguiente no es posible que el reactor opere en ese punto sin control.

Obsérvese que el punto P_1 no tiene interés práctico, ya que la temperatura del reactor es muy baja y por tanto la conversión del óxido de propileno en propilen glicol es muy baja. Por otro lado en el punto P_3 la temperatura es demasiado alta, por lo que aparecen reacciones colaterales que dificultan la conversión.

Los valores de x^*_{2a}, x^*_3, x^*_4 en los puntos P_1, P_2 y P_3 de la figure 2 son los siguientes:

$$\begin{bmatrix} P_1: & 18.718 & 0.0320 & 0.0317 \\ P_2: & 9.889 & 0.0350 & 0.0336 \\ P_3: & 2.482 & 0.0375 & 0.0352 \end{bmatrix}$$

y los correspondientes autovalores son:

$$P_1:\begin{bmatrix} -1.543+1.372\,j & -1.543-1.372\,j & -55.851 & -0.224 \\ -2.1255 & -2 & -2 & -2 \end{bmatrix}$$

$$P_2:\begin{bmatrix} -1.543+1.372\,j & -1.543-1.372\,j & -55.837 & 0.1703 \\ -3.533 & -2 & -2 & -2 \end{bmatrix}$$

$$P_3:\begin{bmatrix} -1.543+1.372\,j & -1.543-1.372\,j & -55.830 & -14.706 \\ -0.193 & -2 & -2 & -2 \end{bmatrix}$$

Los autovalores -1.543 ± 1.372 j son debidos al regulador PI_1 y el autovalor múltiple -2 es debido a las ecuaciones de los inertes (ver ecuaciones (18)). En el caso de la figura 2 los puntos P_1 y P_3 son nodos estables, mientras que P_2 es un nodo inestable.

En conclusión, a temperaturas intermedias donde el reactor funciona mejor, sin control de temperatura, es inestable y por tanto es necesario el regulador PI_2 (véase la figura 1). Aunque otras estrategias de control más sofisticadas pueden considerarse, la idea básica de la necesidad de un sistema de control es la misma.

A continuación vamos a justificar la razón de porqué el regulador PI_2 puede funcionar bien; o sea controlar el reactor a la temperatura del punto P_2. Supongamos que el regulador PI_2 esta en operación y funcionando adecuadamente, de forma que de acuerdo con las ecuaciones (18) se alcanza el punto de consigna, por tanto de las ecuaciones (22) y (23) se deduce:

$$(x_{30}-x_{set})+\frac{c_1 x_{50} x_{2a0}\exp\left(-1/x_{set}\right)}{x_{50}+c_0\exp\left(-1/x_{set}\right)}-c_2(x_{set}-x_{4ec})=0$$

$$c_3 x_{6ec}(x_{40}-x_{4ec})+c_4(x_{set}-x_{4ec})=0$$

(28)

donde x_{4ec} y x_{6ec} son la temperatura y el caudal de fluido refrigerante en equilibrio con control respectivamente, los cuales se determinan a partir de las ecuaciones (28). Utilizando las ecuaciones (27), y teniendo en cuenta los valores de x_{4ec} y x_{6ec} deducidos de la ecuación (28), las ecuaciones del calor generado y

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

eliminado con control se pueden escribir de la forma:

$$q_{gcc}(x_{set}) = \frac{c_1 x_{50} x_{2a0} \exp(-1/x_{set})}{x_{50} + c_0 \exp(-1/x_{set})}$$

$$q_{ecc}(x_{set}) = \left(1 + \frac{c_2 c_3 x_{6ec}}{c_3 x_{6ec} + c_4}\right) x_{set} - \left(x_{30} + \frac{c_2 c_3 x_{6ec} x_{40}}{c_3 x_{6ec} + c_4}\right) \quad (29)$$

Los valores se toman de la tabla 1. De las ecuaciones (29) se deduce que si se incrementa el caudal de refrigerante x_{6ec} es posible cambiar la pendiente de la curva sigmoide de calor generado y la pendiente de la recta de calor eliminado de forma que se corten en un solo punto $x^*_3 = x_{set}$ de forma que si se verifica:

TABLA 1

Variable	Denomination	Valor
F_{A0}	Caudal molar A (kmol A/h)	272.16
F_{B0}	Caudal molar B (kmol B/h)	907.2
F_{M0}	Caudal molar M (kmol A/h)	273.16
F_0	Caudal entrada (m^3/h)	45.85
ρ_{A0}	Densidad molar A (kmol /m^3)	14.78
ρ_{B0}	Densidad molar B (kmol /m^3)	55.27
ρ_{M0}	Densidad molar M (kmol/m^3)	24.67
V	Volumen reactor (m^3)	14.16
V_j	Volumen de la camisa (m^3)	1.416
α	Factor pre-exponencial. (h^{-1})	16.9610^{12}
E	Energía activación (kJ/kmol)	75414
U	Coef. Trans, kJ/(h.m^2.ºC)	2.0110^7
A_j	Area transmisión (m^2)	33
c_{pA}	Calor esp. A (kJ/kg.K)	146.52
c_{pB}	Calor esp. B (kJ/kg.K)	75.35
c_{pC}	Calor esp. C (kJ/kg.K)	192.57
c_{pM}	Calor esp. M (kJ/kg.K)	81.63
c_{pj}	Calor esp. F_j (kJ/kg.K)	4.18
F_j	Caudal refrigerante F_j (m^3/s)	$1.5F_0$
ρ_i	Densidad refrige. (kg/m^3)	1000
T_0	Temperatura entrada (ºC)	15.2
T_{j0}	Temperatura entrada (ºC)	15
R	Constante gases (kJ/kmol.K)	8.314
ΔH_r	Entalpía reacción (kJ/kmol)	- 83793
E	Energía activación (kJ/kmol)	75414
C'_{A0}	Concentración A (kmol/m^3)	0.1547
C'_{B0}	Concentración B (kmol/m^3)	13.8977
C'_{C0}	Concentración C (kmol/m^3)	5.8864
C'_{M0}	Concentración M (kmol/m^3)	5.9352
t_1	Reset del PI_1 (h)	0.005
K_v	Constante PI_1 (h^{-1})	10
t_2	Reset del PI_2 (h)	0.1-0.5
K_t	Constante PI_2 (m^3/h/K)	0.2-1.6

$$\left(1 + \frac{c_2 c_3 x_{6ec}}{c_3 x_{6ec} + c_4}\right) > \left(\frac{dq_{gcc}}{dx_{set}}\right)_{x_{set}} \quad (30)$$

el regulador PI_2 que controla la temperatura del reactor es capaz de estabilizar al reactor en el punto deseado de consigna con valores de x_{30} y x_{2a0} dentro de los intervalos $0.0258 < x_{30} < 0.0389$ y $10 < x_{2a0} < 50$. Para corroborar los razonamientos anteriores, en la figura 3 se muestran las curvas de calor generado y eliminado sin control y con control con los valores de los parámetros tomados de la tabla 1

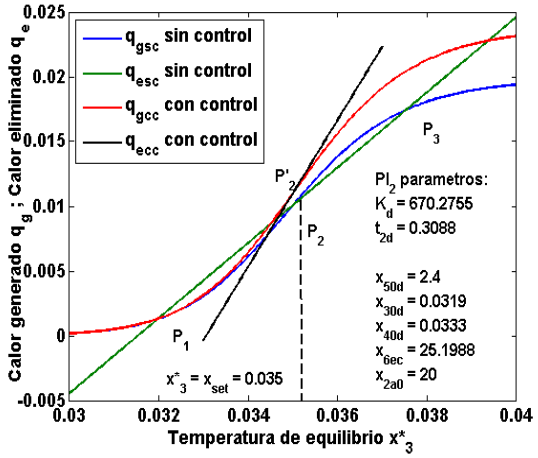


Figura 3: Curvas de calor generado y eliminado sin control y con control PI

Tomando los parámetros del regulador PI_2 y los valores de las perturbaciones que se indican en la figura 3, o sea: $x_{50d} = 2.4$, $x_{30d} = 0.0319$, $x_{40d} = 0.0333$ y $x_{2a0} = 20$, la curva de calor generado y la línea recta de calor eliminado (sin y con control) se indican en la figura 2. Obsérvese que el efecto del control es cambiar la curva de calor generado y subir la pendiente de la recta de calor eliminado para que se corten en un único punto P'_2, que es estable puesto que el calor eliminado es mayor que el generado para $x^*_3 > x_{set}$ e inversamente para $x^*_3 < x_{set}$. Los valores de x^*_{2a}, x^*_3, x^*_4 del punto P'_2 y sus autovalores son los siguientes:

$$\begin{bmatrix} P'_2: & 10.799 & 0.035 & 0.0334 \end{bmatrix}$$

$$P'_2: \begin{bmatrix} -1.543 + 1.372\,j & -1.543 - 1.372\,j & -412.640 & -3.896 \\ -6.167 \cdot 10^{-2} \pm 6.839\,j & -2.4 & -2.4 & -2.4 \end{bmatrix}$$

En consecuencia, P'_2 es un foco estable en presencia del regulador PI_2.

En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos simulando las ecuaciones (18) utilizando el método de Runga-Kutta de 4º orden con intervalos de simulación

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

comprendidos entre 0.001-0.0005 unidades de tiempo adimensional, definido en la ecuación (14) y utilizando las concentraciones de referencia indicadas en la tabla 1. Se observa que el transitorio es oscilante, lo que está de acuerdo con el espectro de valores de los autovalores (foco estable). Se observa que el valor de estado estacionario del caudal adimensional de fluido refrigerante y la temperatura adimensional de consigna se alcanzan con valores de x_{6ec} = 25.1988 y $x_{se\ t}$= 0.035, de acuerdo con los valores de estado estacionario indicados en la figura 3. Es interesante destacar que en este caso se obtiene una conversión del orden del 47 % que puede considerase baja tal como se discutirá en la siguiente sección.

4 REACTOR EN REGIMEN OSCILANTE

En esta sección vamos a estudiar como se puede conseguir el comportamiento oscilatorio con los dos reguladores PI_1 y PI_2 indicados en la figura 1. De acuerdo con las ecuaciones (18), la temperatura de consigna coincide con la de equilibrio del reactor y por tanto se verifica:

$$0 = \frac{K_{td}}{x_{30}}\left(\frac{dx_3}{d\tau} + \frac{1}{t_{2d}}(x_3 - x_{set})\right) \qquad (31)$$

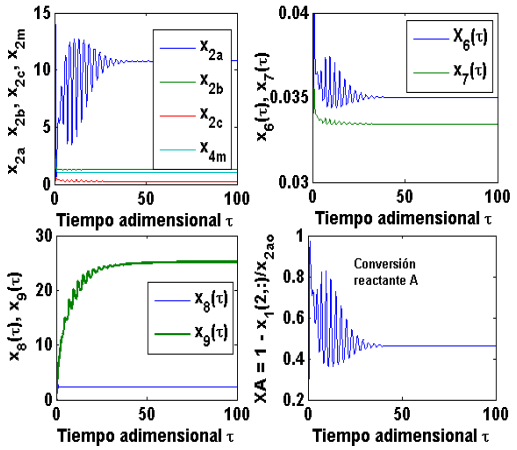


Figura 4:. Respuesta del reactor con reguladores PI_1 y PI_2 y los valores indicados en la figura 3.

La conversión en estado estacionario se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$X_A = 1 - \frac{x_{2a}^*}{x_{2ao}} \;;\; x_{2a}^* = \frac{x_{50}x_{2a0}}{x_{50} + c_0 \exp\left(-1/x_{set}\right)} \qquad (32)$$

y los puntos de equilibrio se deducen de las siguientes ecuaciones:

$$\left.\begin{aligned} & x_5^* = x_{50} \;;\; x_1^* = 1 \;;\; x_{2m}^* = x_{2mo} \\ & x_{2b}^* = \frac{x_{50}x_{2b0} - c_{01}x_{2a}^* x \exp\left(-1/x_{set}\right)}{x_{50}} \\ & x_{2c}^* = \frac{c_{02}x_{2a}^* \exp\left(-1/x_{set}\right)}{x_{50}} \\ & 0 = \frac{1}{x_1^*}(x_{30} - x_{set}) + c_1 x_{2a}^* \exp\left(-1/x_{set}\right) - \frac{c_2}{x_1^*}(x_{set} - x_4^*) \\ & 0 = c_3 x_6^*(x_{40} - x_4^*) + c_4(x_{set} - x_4^*) \Rightarrow x_6^* = \frac{c_4(x_{set} - x_4^*)}{c_3(x_4^* - x_{40})} \end{aligned}\right\} \qquad (33)$$

De acuerdo con las ecuaciones (33) se deduce que la conversión en estado estacionario es independiente de la concentración de entrada del reactante A x_{2a0}. Para estudiar este efecto en la figura 5 se han construido unas curves que muestran como varía la conversión en estado estacionario en función de posibles valores de la temperatura adimensional de consigna y de perturbaciones en el caudal de entrada al reactor, las cuales son compensadas por el regulador PI_1.

A continuación vamos a analizar las condiciones que dan lugar a una conversión superior debido al régimen oscilatorio. La idea consiste en hacer variar los parámetros del regulador PI_2 de forma que en el jacobiano del sistema (18) linealizado en el punto de equilibrio aparezcan un par de autovalores complejos conjugados puros. Una posible combinación de valores de K_d y t_{2d} se puede ver en la figura 6. Tomando distintos valores de K_d y t_{2d}, y escogiendo valores adecuados de x_{set}, x_{2a0} and x_{30} se verifica que dos comportamiento dinámicos claramente diferenciados pueden deducirse

a) Ciclo límite casi simétrico alrededor del punto de equilibrio.

b) Ciclo límite asimétrico de gran amplitud.

Llamando X_{Aos} y X_{Ast} la conversion en regimen auto-oscilante y la obtenida en estado estacionario, simulando las ecuaciones (18) se han encontrado los siguientes valores para el caso a)

x_{set} = 0.0330; x_{2a0} = 40; x_{30} = 0.0320 → X_{Aos} = 0.2812; (X_{Ast} = 0.2670 Figura 4, x_{50} = 1)

x_{set} = 0.0350; x_{2a0} = 25; x_{30} = 0.0319 → X_{Aos} = 0.6792; (X_{Ast} = 0.6680 Figura 4, x_{50} = 1)

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

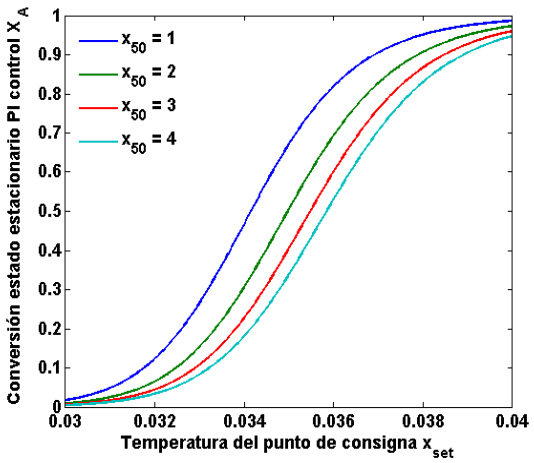


Figura 5: Conversión en estado estacionario con control PI y perturbaciones en el caudal de entrada

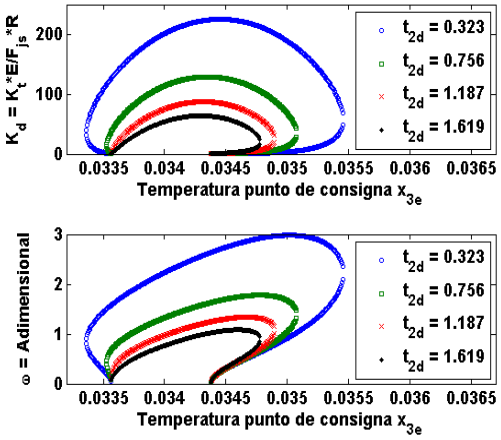


Figure 6: Valores de los parámetros del regulador PI_2 K_d, t_{2d} para comportamiento auto-oscilante y frecuencias correspondientes.

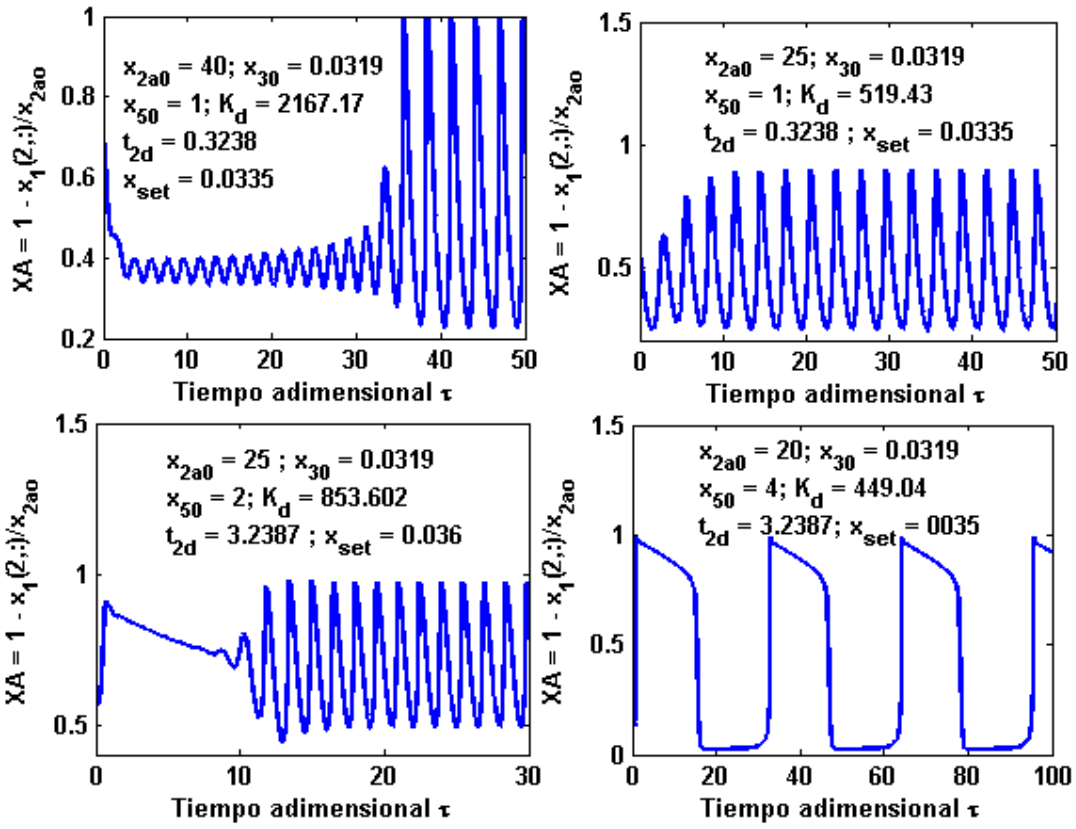


Figura 7: Comportamiento oscilante y órbita de tipo Shilnikov para varios valores de los parámetros del regulador PI_2 y distintas valores de perturbaciones y composición de entrada al reactor.

x_{set} = 0.0350; x_{2a0} = 35; x_{30} = 0.0319 → X_{Aos} = 0.6679; (X_{Ast} = 0.6680 Figura 4, x_{50} = 1)

x_{set} = 0.0350; x_{2a0} = 35; x_{30} = 0.0319 → X_{Aos} = 0.6779; (X_{Ast} = 0.6680 Figura 4, x_{50} = 1)

x_{set} = 0.0360; x_{2a0} = 25; x_{30} = 0.0319 → X_{Aos} = 0.8186; (X_{Ast} = 0.8168 Figura 4, x_{50} = 1)

De los resultados anteriores se deduce que apenas hay diferencia entre la conversión en régimen auto-oscilante y alcanzando el estado estacionario sin oscilar.

Para el caso b) se han obtenido los siguientes resultados:

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$x_{ser} = 0.0330$; $x_{2a0} = 30$; $x_{30} = 0.0310 \rightarrow X_{Aos} = 0.3480$; ($X_{Ast} = 0.2670$ Figura 4, $x_{50} = 1$)

$x_{ser} = 0.0335$; $x_{2a0} = 40$; $x_{30} = 0.0310 \rightarrow X_{Aos} = 0.4413$; ($X_{Ast} = 0.3650$ Figure 4, $x_{50} = 1$)

$x_{ser} = 0.0335$; $x_{2a0} = 25$; $x_{30} = 0.0319 \rightarrow X_{Aos} = 0.4673$; ($X_{Ast} = 0.3650$ Figura 4,$x_{50} = 1$)

$x_{set} = 0.0350$; $x_{2a0} = 20$; $x_{30} = 0.0319 \rightarrow X_{Aos} = 0.4341$; ($X_{Ast} = 0.3364$ Figura 4,$x_{50} = 4$)

$x_{set} = 0.0360$; $x_{2a0} = 25$; $x_{30} = 0.0319 \rightarrow X_{Aos} = 0.6750$; ($X_{Ast} = 0.5329$ Figura 4, $x_{50} = 2$)

En este caso aparecen orbitas tipo Shlinikov [5], [4], [8] y tal como se muestra en la figura 7 y la conversión media en régimen de auto-oscilación conseguido ajustando adecuadamente los parámetros del regulador PI_2, es superior al valor conseguido en estado estacionario.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el problema de como obtener comportamiento oscilatorio para mejorar la conversión de óxido de propileno en propilen glicol en un reactor tipo tanque continuo y agitado que está controlado por dos reguladores PI.

Dado el gran número de parámetros y variables implicados, se usan variables adimensionales para simplificar las ecuaciones del modelo. El regulador PI_1 manipula el caudal de salida del reactor para mantener constante la altura de la mezcla reaccionante, mientras que el regulador PI_2 manipula el caudal de refrigerante para mantener en el punto de consigna la temperatura del reactor.

Se demuestra la necesidad de un sistema de control a partir del análisis en estado estacionario de las curvas de calor generado y eliminado sin control y con control

El comportamiento oscilatorio se obtiene imponiendo la condición de que aparezcan dos autovalores complejos conjugados puros en la matriz jacobiana del sistema global. Se comprueba que el reactor puede funcionar en régimen oscilante con una adecuada selección de los parámetros del regulador PI_2 y que debido a la aparición de un tipo especial de ciclos límites (órbitas de Shilnikov) es posible mejorar la conversión media del reactante.

Referencias

[1] Albertos P., Pérez Polo M. F., Nonisothermal Stirred Tank Reactor with Irreversible Exothermic Reaction A → B. 1. Modeling and Local Control. Selected Topics on Biochemical and Chemical Control Process. Springer Verlag, 2007.

[2] Fogler H. S., Elements of Chemical Reaction Engineering. Prentice Hall, 1999.

[3] Pérez Polo M,. Comportamiento caótico de un reactor tipo tanque en régimen de auto-regulación XXI Jornadas de Automática, Sevilla, 2000.

[4] Pérez Polo, M. Albertos P., Regular and Chaotic Behavior of a PI-Controlled CSTR. NOLCOS 2001, IFAC. S. Petersburg, Russia, July, 2001.

[5] Pérez Polo M,, Albertos P., Self-oscillating and chaotic behaviour of a PI-controlled CSTR with control valve saturation. Journal of Process Control, Vol 14, 51-59, 2004.

[6] Pérez Polo M.F., Albertos P., Nonisothermal Stirred Tank Reactor with Irreversible Exothermic Reaction A → B. 2. Nonlinear Phenomena. Selected Topics on Biochemical and Chemical Control Process. Springer Verlag, 2007.

[7] Pérez Polo M. F., Berná Galiano J. A., Gil Chica J., Montava Belda M. A., Fenómenos no lineales en el control de reactores continuos tipo tanque agitados, XXVI Jornadas de Automática, Alicante, 2005.

[8] Pérez Polo M., Font R., Montava M. A.. Regular Self-oscillating and Chaotic Dynamics of a Continuous Stirred Tank Reactor. Computers & Chemical Eng. Vol.. 26, Nº 6, 889-901,2002.

[9] Pérez Polo M. F., Pérez-Molina M., Self-oscillating chaotic behavior and induced oscillations of a continuous stirred tank reactor with nonlinear control, Chem. Eng. Journal., 19, 512-527, 2012.

[10] Pérez Polo M. F., Pérez-Molina M., Saddle-focus bifurcation and chaotic behavior of a continuous stirred tank reactor using PI control, Chem Eng, Science., 74, 79-82, 2012.

[11] Pérez Polo M. F., Pérez-Molina M., Increasing the reactant conversion through induced oscillations in a continuous stirred tank reactor by using PI control, Journal of Process Control, 23, 778-792, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL PID DE UN SERVOMECANISMO NO LINEAL USANDO LA FUNCION DESCRIPTIVA Y LA BIFURCACION DE BOGDANOV-TAKENS

Manuel F. Pérez Polo, Manuel Pérez Molina, Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano
Departamento de Física Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. Escuela Politécnica Superior. Apartado 99, E-03080. Alicante. E-mail: manolo@dfists.ua.es; ; ma_perez_m@hotmail.com ; gil@dfists.ua.es ; jberna@dfists.ua.es

Resumen

En este trabajo se investiga como ajustar los parámetros de un regulador PID, que controla la posición del eje de un servomecanismo con una no linealidad cúbica. Se demuestra a partir de las ecuaciones del modelo y del regulador PID, que en el jacobiano del sistema linealizado pueden aparecer dos ceros, lo que da lugar a una bifurcación de Bogdanov-Takens, cuyas condiciones de estabilidad se estudian con el teorema de la variedad central y el segundo método de Lyapunov, lo que permite determinar la acción proporcional e integral del regulador. La acción derivada se calcula a través de la función descriptiva de la no linealidad cúbica, lo que permite obtener una aproximación de la frecuencia de auto-oscilación.
Se supone que la entrada de referencia se puede variar senoidalmente y que existe una pequeña perturbación armónica en el eje de salida del servomecanismo. En este contexto, pueden aparecer oscilaciones caóticas que se utilizan para obtener señales de control pequeñas. El ajuste del regulador PID se comprueba en presencia de ruido aleatorio.

Palabras clave: Servomecanismo, no linealidad cúbica, ajuste regulador PID, bifurcación de Bogdanov-Takens, función descriptiva, caos

1 INTRODUCCIÓN

El control de dispositivos electromecánicos se ha centrado casi exclusivamente en la utilización de modelos lineales, a pesar de que es conocido que en tales dispositivos aparecen fuertes no linealidades cuando funcionan en régimen de grandes desviaciones respecto al estado de equilibrio [4].
Una posible solución a este problema es usar la teoría de bifurcaciones, a pesar de que en sistemas de dimensiones mayores que tres, se ha usado poco en el análisis y diseño de un posible sistema de control. La bifurcación de Hopf (que aparece cuando en la matriz de la parte lineal del sistema tiene un par de autovalores complejos conjugados puros) es una excepción, ya que ha sido usada en el análisis y diseño de muchos sistemas de control [11], [6] sin embargo, la bifurcación de Bogdanov-Takens (cuando la matriz de la parte lineal del sistema tiene dos autovalores cero) se ha usado mucho menos que la anterior [11], [6], [10], [1], [2], [12].
En este trabajo se presenta un método de control de un servomecanismo no lineal de posición [8] basado en un regulador PID cuyos parámetros se ajustan teniendo en cuenta la bifurcación de Bogdanov-Takens [3], [5], [7], [13]. Para ello se obtiene el modelo del sistema reducido a la variedad central, a partir del cual se estudia la estabilidad usando el segundo método de Lyapunov, lo que permite determinar la constante de acción proporcional e integral del regulador PID. La acción derivada del regulador PID permanece desconocida, por lo que se ha utilizado la función descriptiva, lo que permite estimar tanto la frecuencia de auto-oscilación del sistema como la constante de acción derivada del regulador PID [8], [13]
Una vez alcanzado el régimen de auto-oscilación, se comprueba que una variación armónica de la entrada de referencia puede dar lugar a comportamiento caótico [9], [10], [11], que se ha usado para mejorar el funcionamiento del regulador PID. Finalmente, la robustez del diseño se ha comprobado suponiendo que existe ruido aleatorio en el par de perturbación aplicado en el eje de salida.

2 MODELO DEL SISTEMA

El sistema está formado por un cuerpo, cuya posición se desea controlar, conectado a un tren de engranajes considerado ideal con relación de transmisión $n = N_1/N_2$. El tren de engranajes está conectado a un motor DC controlado por armadura, al cual se le aplica el voltaje de entrada $u_a(t)$ a través de un amplificador de constante K_a. El sistema se realimentado con un potenciómetro de constante K_s cuyo voltaje de salida se aplica al regulador PID conectado a una no linealidad cúbica de constante K_{ne}. Los

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

valores de los parámetros se indican en la leyenda de la figura 1.
A partir de la figura 1.las ecuaciones del modelo matemático del servomecanismo y sistema de control son las siguientes:
Potenciómetro:

$$u(t) = K_s\left[\theta_r(t) - \theta(t)\right] \qquad (1)$$

Regulador PID:

$$u_1(t) = K_p\left[u(t) + \frac{1}{\tau_i}\int_0^t u(\sigma)\,d\sigma + \tau_d\frac{du(t)}{dt}\right] \qquad (2)$$

siendo K_p, τ_i y τ_d las constantes del regulador.

Elemento no lineal:

$$u_2(t) = K_{ne}u_1^3(t) \qquad (3)$$

siendo J_m y J_L los momentos de inercia del motor y de la carga respectivamente. B_m y B_L son la fricción viscosa del motor y de la carga y J_{me} y B_{me} son el momento de inercia y la fricción viscosa reducidos al eje del motor. Los valores, $T_m(t)$, $T'_m(t)$, $T'_L(t)$ and $T_d(t)$ representan el par motor, el par motor para mover el eje más la fricción viscosa, el par de carga y el par de perturbación respectivamente.
Par motor asumiendo régimen lineal:

$$T_m(t) = K_m i_a(t) \qquad (6)$$

en donde K_m es la constante del par.

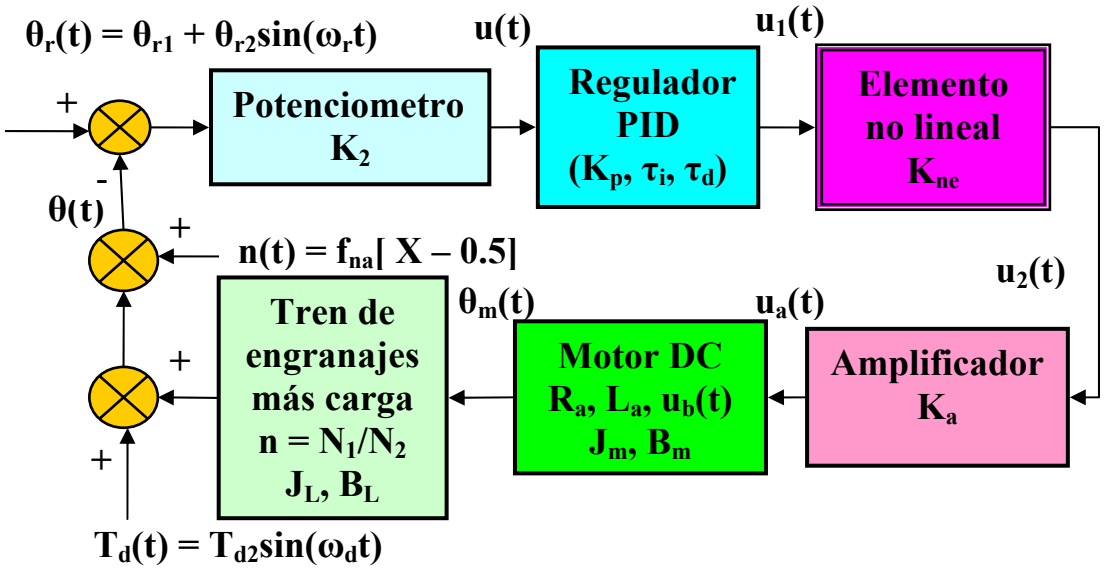


Figura 1: Diagrama de bloques del servomecanismo con el sistema de control. $J_m = 1.36.10^{-2}$ kg.m^2, $B_m = 9.64.10^{-3}$ N.m.s, $R_a = 5\ \Omega$, $L_a = 0.01$ H, par motor K_m; constante de fuerza contra-electromotriz $K_b = K_m$ Parametros de la carga: $J_L = 1.36$ kg.m^2, $B_L = 0.136$ N.m.s; n = 0.1; $K_s = 10/\pi$ V/rad y K_a = 10-100; K_{ne} 0.1 V^{-2}.

Intensidad de corriente en la armadura:

$$L_a\frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = u_a(t) - u_b(t)$$
$$u_b(t) = K_b\omega_m(t) = K_b\frac{d\theta_m(t)}{dt} \qquad (4)$$

siendo $u_b(t)$ la fuerza contra-electromotriz, $\theta_m(t)$ es el ángulo girado en el eje del motor y is the $\omega_m(t)$ es la velocidad angular del eje del motor.

Ecuaciones del par motor:

$$J_{me}\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + B_{me}\frac{d\theta_m(t)}{dt} = T_m(t)\ ;\ J_{me} = J_m + (N_1/N_2)^2 J_L$$
$$B_{me} = B_m + (N_1/N_2)^2 B_L\ ;\ T_m(t) = T'_m(t) + T'_L(t) + T_d(t) \qquad (5)$$

La entrada de referencia $\theta_r(t)$ y el par de perturbación se definen a través de las ecuaciones:

$$\theta_r(t) = \theta_{r1} + \theta_{r2}\sin(\omega_r t)\ ;\ T_d(t) = T_{d2}\sin(\omega_d t) \qquad (7)$$

en donde los parámetros de las ecuaciones (7) pueden seleccionarse arbitrariamente. Puesto que $\theta_m = (N_1/N_2)\theta$, y teniendo en cuenta que es posible eliminar la corriente de la armadura $i_a(t)$ entre las ecuaciones (4) y (5).y si se tomen derivadas de hasta tercer orden en la ecuación (1), teniendo en cuenta las ecuaciones (5), (6) y

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

(7) se puede obtener el modelo del sistema de la siguiente forma:

$$\frac{d^3u(t)}{dt^3}+\frac{2\xi}{\tau}\frac{d^2u(t)}{dt^2}+\frac{1}{\tau^2}\frac{du(t)}{dt}=$$
$$-\frac{K}{\tau^2}u_1^3(t)+\frac{nK_s}{J_{me}}\left[\frac{R_a}{L_a}T_{d2}\sin(\omega_d t)+T_{d2}\omega_d\cos(\omega_d t)\right]$$
$$+\frac{K_s}{\tau^2}\theta_{r2}\omega_r\cos(\omega_r t)-\frac{2\xi K_s}{\tau}\theta_{r2}\omega_r^2\sin(\omega_r t)-$$
$$-K_s\theta_{r2}\omega_r^2\cos(\omega_r t)$$
$$\frac{du_1(t)}{dt}=\frac{K_p}{\tau_i}u(t)+K_p\frac{du(t)}{dt}+K_p\tau_d\frac{d^2u(t)}{dt^2}$$

(8)

siendo:

$$\tau^2=\frac{J_{me}L_a}{K_mK_b+R_aB_{me}}\ ;\ K'=\frac{nK_mK_a}{J_{me}L_a}\tau^2$$
$$2\xi\tau=\left(\frac{B_{me}}{J_{me}}+\frac{R_a}{L_a}\right)\frac{J_{me}L_a}{K_mK_b+R_aB_{me}}\ ;\ K=K_{ne}K_sK'$$
$$\xi=\frac{1}{2}\left(\frac{B_{me}}{J_{me}}+\frac{R_a}{L_a}\right)\sqrt{\frac{J_{me}L_a}{K_mK_b+R_aB_{me}}}$$
$$K_m=\sqrt{\frac{L_aJ_{me}}{4\xi^2}\left[\left(\frac{B_{me}}{J_{me}}\right)+\left(\frac{R_a}{L_a}\right)\right]-R_aB_{me}}$$

(9)

donde K_m se calcula de forma que $0 < \xi < 1$. Se puede comprobar que ξ es adimensional mientras que las unidades de τ, K' y K son (s), $V^{-1}s^{-1}$ y $V^{-2}s^{-1}$ respectivamente. Las ecuaciones (8) y (9) se usarán para analizar la presencia de la bifurcación de Bogdanov-Takens [3], [8], [9], [13].

3 ANALISIS DE LA BIFURCACION BOGDANOV-TAKENS

Suponiendo que no hay par de perturbación ($T_{d2} = 0$) y que la entrada de referencia es un escalón ($\theta_{r2} = 0$), introduciendo las variables de estado:

$$x_1(t)=u(t)\ ;x_2(t)=\frac{du(t)}{dt}\ ;\ x_3(t)=\frac{d^2u(t)}{dt^2}\ ;x_4(t)=u_1(t)$$

(10)

las ecuaciones (8) se pueden escribir de la forma:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\\ \dot{x}_3(t)\\ \dot{x}_4(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & -1/\tau^2 & -2\xi/\tau & 0\\ K_p/\tau_i & K_p & K_p\tau_d & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_3(t)\\ x_4(t)\end{bmatrix}+$$
$$+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -K/\tau^2\\ 0\end{bmatrix}x_4^3(t)\Longrightarrow\dot{x}(t)=Ax(t)+Bx_4^3$$

(11)

Se puede comprobar que los autovalores de la matriz A (ecuación (11)) son:

$$|\lambda I-A|=\lambda^2\left[\lambda^2+(2\xi/\tau)\lambda+(1/\tau^2)\right]=0$$
$$\lambda_{1,2}=0\ ;\ \lambda_{3,4}=-\alpha\pm\omega j \qquad ..(12)$$
$$\alpha=\xi/\tau\ ;\ \omega=\sqrt{1-\xi^2}/\tau\ ;\ \text{for}\ 0<\xi<1$$

y por consiguiente aparece un doble cero en el punto de equilibrio de las ecuaciones (11), que es el origen. El análisis de la bifurcación se lleva a cabo a través de una serie de pasos para obtener un sistema simplificado reducido a la variedad central [3], [5], [13] el cual mantiene todas las propiedades dinámicas del sistema en un entorno del punto de equilibrio.

Paso 1.

Sea P la matriz de paso que transforma la parte lineal de la ecuación (11) en su forma canónica de Jordan. Las columnas de P son los vectore propios de los autovalores de la ecuación (12):

$$x=P\bar{x}\Rightarrow\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \tau_i/K_p & 0 & 1\\ 0 & 0 & \omega & -\alpha\\ 0 & 0 & -2\alpha\beta & \alpha^2-\omega^2\\ 1 & 0 & b & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ y\\ z\\ w\end{bmatrix}$$
$$a=\frac{-\alpha K_p/\tau_i}{\alpha^2+\omega^2}+K_p(1-\tau_d\alpha)\ ;\ b=\frac{-\omega K_p/\tau_i}{\alpha^2+\omega^2}+K_p\tau_d\omega$$

(13)

Paso 2.

A partir de la s ecuaciones (13) las ecuaciones (11) se pueden escribir de la forma:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\\ \dot{w}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -\alpha & -\omega\\ 0 & 0 & \omega & -\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ y\\ z\\ w\end{bmatrix}+P^{-1}\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -K/\tau^2\\ 0\end{bmatrix}(x+bz+aw)^3$$

(14)

siendo P^{-1} la matriz inversa de P dada por la ecuación (13). Teniendo en cuenta las ecuaciones (13), la ecuación (14) en las nuevas coordenadas queda de la forma:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\\ \dot{w}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -\alpha & -\omega\\ 0 & 0 & \omega & -\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ y\\ z\\ w\end{bmatrix}+\frac{K}{\omega}\begin{bmatrix}-(\omega a+\alpha b)\\ -K_p\omega/\tau_i\\ \alpha\\ \omega\end{bmatrix}(x+bz+aw)^3$$

(15)

Paso 3.

A continuación se simplifica la ecuación (14) tanto como sea posible para reducir la dimensión del sistema a dos. Para ello, y puesto que la no linealidad es cúbica, las coordenadas *z* y *w* se aproximan por

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\left.\begin{aligned} z &= c_1x^3 + c_2y^3 + c_3x^2y + c_4xy^2 \\ w &= d_1x^3 + d_2y^3 + d_3x^2y + d_4xy^2 \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

donde c_i y d_i ($i = 1,2,3,4$) se calculan aplicando el teorema de la variedad central. Sin embargo estos coeficientes no son necesarios para analizar la bifurcación, ya que el sistema reducido a la variedad central hasta términos de 5º orden se puede escribir directamente sin tener en cuenta los c_i y d_i, o sea:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} x^3 + \mathrm{O}\left(\|x\|^5\right)$$
$$d_1 = -\frac{K}{\omega}\left(\omega a + \alpha b\right) \;;\; d_2 = -\frac{KK_p}{\tau_i} \quad (17)$$

en donde los parámetros “a” y “b” viene definidos en la ecuación (13).
Una vez que se ha obtenido el sistema reducido a la variedad central, el análisis de estabilidad se lleva a cabo a través del segundo método de Lyapunov. Para ello se escoge una función tentativa de Lyapunov de la forma:

$$V\left(x,y\right) = \frac{1}{2}px^4 + y^2 \quad (18)$$

donde p > 0 es un parámetro dimensional con unidades de $V^{-2}s^{-2}$ y $V\left(x,y\right)$ es una función definida positiva. Tomando la derivada respecto del tiempo en la ecuación (18) y sustituyendo las ecuaciones del sistema truncado hasta 5º orden se deduce que

$$\dot{V}\left(x,y\right) = 2px^3\dot{x} + 2y\dot{y} = 2\left(p + d_2\right)x^3y + 2pd_1x^6 \quad (19)$$

De las ecuaciones (18) y (19) se deduce que el origen será asintóticamente estable cuando $\dot{V}\left(x,y\right) < 0$ que se cumple si:

$$p + d_2 = 0 \Rightarrow p - \frac{KK_p}{\tau_i} = 0$$
$$d_1 = -\frac{K}{\omega}\left(\omega a + \alpha b\right) < 0 \Rightarrow \left(\omega a + \alpha b\right) > 0 \quad (20)$$

siendo p un parámetro dimensional con unidades de $V^{-2}s^{-2}$. De las ecuaciones (17) y (20) se deduce que:

$$\omega a + \alpha b = K_p\omega - \frac{2\alpha\omega p}{K\left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \Rightarrow K_p > \frac{2\alpha p}{K\left(\alpha^2 + \omega^2\right)}$$
$$\tau_i = KK_p \quad (21)$$

en donde se ha considerado la sustitución: $K_p/\tau_i = p/K$.

Nótese la acción derivada no aparece en las ecuaciones (21) y no se puede determinar a partir de la bifurcación Bogdanov-Takens.
En resumen las condiciones de estabilitdad son:

$$K_p > \frac{2\alpha p}{K\left(\alpha^2 + \omega^2\right)} \Rightarrow K_p = \frac{2\alpha pf}{K\left(\alpha^2 + \omega^2\right)}$$
$$\tau_i = \frac{2\alpha pf}{\alpha^2 + \omega^2} \quad (22)$$

en donde el parámetro f $\geq$ 1 hay que introducirlo para calcular valores admisibles de K_p. De las ecuaciones (17), (20) (21) y (22) tomando f = 1 se deduce que:

$$\ddot{x} = -px^3 \Rightarrow p\frac{x^4}{2} + y^2 = Cte \quad (23)$$

y por tanto aparece un ciclo límite en el plano de fases del sistema reducido a la variedad central, o sea la condición de auto-oscilación del sistema (f = 1 en la ecuación (23)) se ha determinado. Este comportamiento dinámico es importante puesto que en régimen auto-oscilante la presencia de cualquier componente armónica en la señal de entrada o en la carga puede dar lugar a comportamiento caótico. En lo que sigue supondremos que $p = 1\ V^{-2}s^{2}$.

4 CALCULO DE LA ACCION DERIVADA CON LA FUNCION DESCRIPTIVA

En la sección anterior la constante τ_d del regulador PID permanece desconocida, por lo que en esta sección la técnica de la función descriptiva [4] se va a aplicar para investigar la influencia de τ_d en el comportamiento auto-oscilante.
A la vista de la figura 1 y de las ecuaciones (1) a (9) se deduce que la función transferencia del regulador PID y del conjunto motor-amplificador-engranajes y carga viene dadas por las ecuaciones:

$$G_{PID}\left(s\right) = \frac{U_1\left(s\right)}{U\left(s\right)} = K_p\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right)$$
$$G\left(s\right) = \frac{\theta\left(s\right)}{U_2\left(s\right)} = \frac{K'}{s\left(\tau^2s^2 + 2\xi\tau s + 1\right)} \quad (24)$$

Suponiendo una entrada senoidal de la forma $u_1\left(t\right) = U_{1m}\sin\omega t$ en el elemento no lineal y que G(s) se asemeja a un filtro paso bajo, la función descriptiva $N(U_{1m})$ del elemento no lineal viene dada por la ecuación:

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$u_2(t) \approx \frac{3K_{ne}U_{1m}^3}{4}\sin\omega t \Rightarrow N(U_{1m}) = \frac{3K_{ne}U_{1m}^3}{4} \quad (25)$$

De las ecuaciones (24) y (25) la salida G(s) será:

$$\theta(t) = \frac{3K_{ne}U_{1m}^3}{4}|G(j\omega)|\sin(\omega t + \varphi_{1\theta})$$

$$|G(j\omega)| = \frac{K'}{\omega\Delta}\sqrt{4\xi^2\tau^2\omega^2 + (1-\tau^2\omega^2)^2}$$

$$\Delta = 4\xi^2\tau^2\omega^2 + (1-\tau^2\omega^2)^2 \;;\; \varphi_{1\theta} = arctg\left(\frac{1-\tau^2\omega^2}{2\xi\tau\omega}\right) \quad (26)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (25) y (26) la salida del regulador PID se puede escribir de la forma:

$$u_1(t) = \frac{3K_{ne}K_sU_{1m}^3}{4}|G(j\omega)|\sin(\omega t + \varphi_{1\theta} + \varphi_{1PID} + \pi)$$

$$\varphi_{1PID} = -arctg\left(\frac{1-\tau_i\tau_d\omega^2}{\tau_i\omega}\right) \quad (27)$$

Por otro lado, `puesto que $u_1(t)$ es conocida, identificando la amplitud y la fase en las ecuaciones (25)-(27) se deduce que:

$$\frac{3K_{ne}K_sU_{1m}^3}{4}|G(j\omega)| = U_{1m}$$

$$\varphi_{1\theta} + \varphi_{1PID} + \pi = 0 \Rightarrow tg(\varphi_{1\theta} + \varphi_{1PID}) = 0$$

$$U_{1m} = \frac{2}{\sqrt{3K_{ne}K_s|G(j\omega)|}} \;;\; \omega_{os} = \sqrt{\frac{\tau_i - 2\xi\tau}{\tau_i\tau(\tau - 2\xi\tau_d)}} \quad (28)$$

donde U_{1m} y ω_{os} son la entrada de voltaje en el elemento no lineal y la frecuencia de oscilación respectivamente. De las ecuaciones (28) se deduce:

$$\tau_i > 2\xi\tau \;;\; \tau > 2\xi\tau_d \Rightarrow \tau_i > 4\xi^2\tau_d \Rightarrow \tau_d < \frac{\tau_i}{4\xi^2} \quad (29)$$

y por tanto se ha vuelto a obtener la misma condición para el tiempo de reset τ_i que se obtuvo en la sección anterior como se puede comprobar de las ecuaciones (21), (22) y (29). Suponiendo que p = 1 y f > 1, el tiempo derivado se puede expresar como:

$$\tau_d < \frac{\tau_i}{4\xi^2} \Rightarrow \tau_d < \frac{2f\xi\tau}{4\xi^2} \Rightarrow \tau_d = f_1\frac{f\tau}{2\xi} \;;\; (f_1 < 1) \quad (30)$$

Sustituyendo las ecuaciones (29) y (30) en la ecuación (28) se deduce:

$$\omega_{os} = \frac{1}{\tau}\sqrt{\frac{f-1}{f(1-f\cdot f_1)}} \Rightarrow \omega_{os\min} = \frac{1}{\tau}\sqrt{\frac{f-1}{f}} \quad (31)$$

donde ω_{osmin} es el mínimo valor que puede tomar la frecuencia de auto-oscilación. Hay que tener en cuenta que la frecuencia de auto-oscilación aparece para $f = 1$, y por tanto la ecuación (31) no se puede aplicar. Puesto que la constante de tiempo es muy pequeña (ver ecuación (9) y valores de parámetros indicados en la leyenda de la figura 1) se debe escoger $f >$ 1 y muy próxima a la unidad (por ejemplo $f =$ 1.00001 para asegurar muy aproximadamente la condición de auto-oscilación con $ff_1 < 1$. De los razonamientos anteriores es posible definir un intervalo de frecuencias de auto-oscilación $\omega_{os1} > \omega_{osmin}$ y $\omega_{os2} > \omega_{os1}$, y los correspondientes mínimo y máximo valores permitidos para el parámetro f_1 o sea:

$$f_{1\min} = \frac{1}{f}\left[1 - \frac{f-1}{f(\omega_{os1}\tau)^2}\right] ; f_{1\max} = \frac{1}{f}\left[1 - \frac{f-1}{f(\omega_{os2}\tau)^2}\right] \quad (32)$$

Con este procedimiento es posible seleccionar un intervalo de valores para la frecuencia de auto-oscilación. A continuación, seleccionando un valor de f_1 tal que $f_{1min} < f_1 < f_{1max}$, es posible determinar la frecuencia de auto-oscilación y el el tiempo derivativo τ_d del regulador PID. Además si se elige $f >> 1$, los correspondientes valores de los parámetros K_p y τ_i del regulador PID pueden llevar al eje de salida del servomecanismo a la posición especificada en el punto de consigna, y por tanto el diseño del regulador PID se ha completado. Hay que resaltar que si el valor de f es muy grande, el tiempo de reset es también grande y por tanto la acción integral es pequeña por lo que un gran error en estado estacionario puede aparecer.

5 ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se analizan varios ejemplos para analizar el diseño y comportamiento del servomecanismo controlado con el regulador PID diseñado con el procedimiento indicado en las secciones 3 y 4. El método de simulación utilizado para las ecuaciones (8) y (9) ha sido el de Runge-Kutta de 4º orden, con intervalos de simulación comprendidos entre 0.0001 y 0.001 s. Primero se analizan las condiciones de auto-oscilación y después se estudia como cambiar los parámetros del regulador PID para alcanzar un punto de consigna deseado.

A partir de $f = 1 + 10^{-6}$ se han obtenido los valores de $K_p = 0.0099$, $\tau_i = 0.0072$ s y $\omega_{osmin} =$

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

0.2634 rad/s de acuerdo a las condiciones de auto-oscilación dadas por las ecuaciones (22) y (31). A continuación se escogen las frecuencias ω_{os1} = 0.28 y ω_{os2} = 3 rad/s con los correspondientes valores f_{1min} = 0.1153 and f_{1max} = 0.9923 calculadas a partir de las ecuaciones (32).Escogiendo una frecuencia de auto-oscilación deseada de ω_{os} = 0.65 rad/s, se obtiene el valor de f_1 = 0.8358 y a partir de la ecuación (30) se obtiene un tiempo derivado de τ_d = 0.0017.

Es importante destacar que el comportamiento auto-oscilante depende de las condiciones iniciales de la señal de control $u_1(0)$. Por tanto el valor inicial de las variables de estado se toman todos cero excepto el voltaje $x_4(0) \equiv u_1(0) = U_{1m}$ = 0.7506 V, que se calcula teniendo en cuenta la ecuación (28), que es la condición de auto-oscilación obtenida con la función descriptiva.

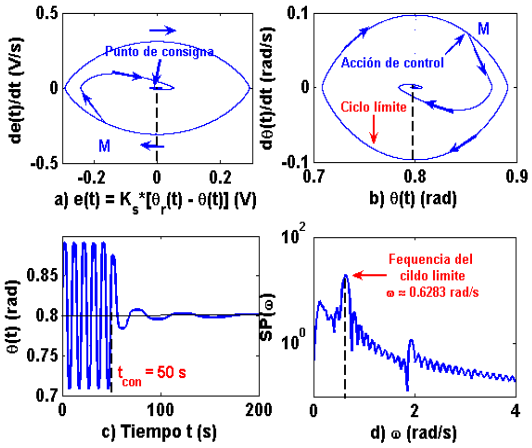


Figura 2: Tiempo de simulación t = 200 s, , K_a = 100, ξ = 0.95, τ = 3.7969.10^{-3} s, K_m = 4.3373 N.m/A, p = 1, f = 1 + 10^{-6}, ω_{osmin} = 0.2634 rad/s, ω_{os1} = 0.28, ω_{os2} = 3, f_{1min} = 0.1153, f_{1max} = 0.9923, ω_{os} = 0.65 rad/s, f_1 = 0.8358, K_p = 0.0099, τ_i = 0.0072 s, τ_d = 0.0017 s, U_{1m} = 0.7506, θ_{r1} = θ_{r2} = 0 , T_{d2} = 0. Condiciones iniciales x_o = [0 0 0 0.7506]. El control para estabilidad se aplica en t_{con} = 50 s with f = 200, K_{pc} = 1.9718, τ_{ic} = 1.4428 s and τ_{dc} = τ_d = 0.0017 s, punto de consigna θ_{sp} = 0.8 rad.

Los resultados de la simulación y los valores de los parámetros utilizados se muestran en la figura 2. En las figuras 2 a) y 2 b) se muestran ciclos límites durante el tiempo $0 \le t \le t_{con}$ ya que los parámetros f ≈ 1 y f_1 = 0.8358 dan valores de las constantes del regulador PID que dan comportamiento auto-oscilante. En el instante t_{con} = 50 se cambia f = 200 y se obtienen nuevos valores de K_p y τ_i tal que el punto de equilibrio es asintóticamente estable. La figura c) muestra la respuesta temporal y en la d) se ha calculado la densidad espectral de potencia de la señal $u_1(t)$ para comprobar que la frecuencia de oscilación (0.6283 rad/s) está próximo al valor teóricamente calculado con la ecuación (28) (ω_{os} = 0.65 rad/s).

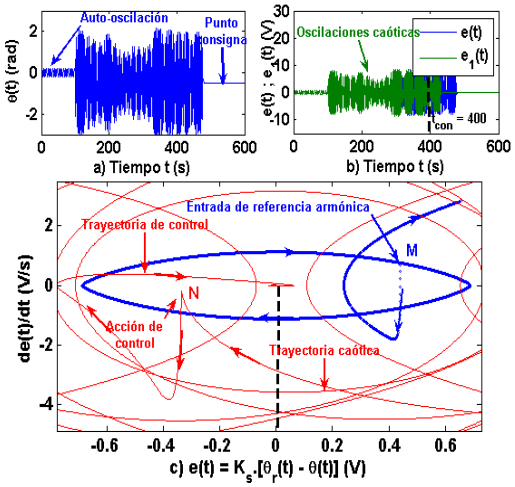


Figura 3: Comportamiento caótico. Tiempo de simulación t = 600 s, intervalo de simulación T = 0.001 s, K_a = 100, ξ = 0.95, τ = 3.7969.10^{-3} s, K_m = 4.3373 N.m/A, p = 1, f = 1 + 10^{-5}, ω_{osmin} = 0.8328 rad/s, ω_{os1} = 0.84, ω_{os2} = 3, f_{1min} = 0.017, f_{1max} = 0.9229, ω_{os} = 1 rad/s, f_1 = 0.3064, K_p = 0.0099, τ_i = 0.0072 s, τ_d = 6.1224.10^{-4} s, U_{1m} = 1.1547, entrada de referencia en t_r = 100 s, θ_{r1} =1, θ_{r2} = 3.456, ω_r = 0.987 ras/s y T_{d2} = 0. Condiciones iniciales x_o = [0 0 0 1.1547]. Cambio valores regulador PID en t_{con} = 400 s con f = 200, K_{pc} = 1.9718, τ_{ic} = 1.4428 s y τ_{dc} = τ_d = 6.1224.10^{-4} s, punto de consigna θ_{sp} = -0.5 rad, región de captura: r_{cx} = 0.8 V, r_{cy} = 0.2 V/s.

La figura 3 muestra un comportamiento dinámico muy interesante cuando se varía armónicamente el punto de consigna a partir del instante t = 100 s (ver ecuaciones 8 y 9). Como en el caso de la figura 2, se eligen valores de K_p, τ_i y τ_d para obtener comportamiento auto-oscilante con ω_{os} = 1 rad/s (el valor obtenido en la simulación es 0.9844 rad/s). En el instante t = 100 s el punto de consigna se varía de cero a $\theta_r(t) = 1 + 3.456\sin(0.987t)$, lo que da lugar a la aparición de oscilaciones caóticas como se muestra en la figura 3 a). En la figura 3 b) se muestran dos valores de la variable $x_1(t)$ obtenidos con dos condiciones iniciales que difieren en 10^{-10}. Se observa que para t ≈ 250 s las oscilaciones son completamente diferentes con fuerte dependencia sensible, que es un indicador de comportamiento caótico. [2], [3], [13]. Puesto que el punto de consigna está dentro del atractor extraño, que aparece como consecuencia del comportamiento caótico, siempre existirá una órbita caótica que pase muy cerca del punto de consigna. Por consiguiente, cambiando el valor del parámetro f (ecuaciones (22) y (30)) cuando una órbita

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cruce una pequeña zona de captura (r_{cx}, r_{cy}) definida alrededor del punto de consigna (ver figura 3 c)) será posible posicionar el servomecanismo en un punto de consigna predeterminado, con valores muy pequeños de la señal de control $u_1(t)$. Puesto que el momento en que esto suceda es a priori desconocido, la región de captura debe de elegirse para evitar largos tiempos de espera antes de alcanzar el punto de consigna. Los valores de los parámetros para los diferente comportamientos dinámicos se indican en la leyenda de la figura 3.

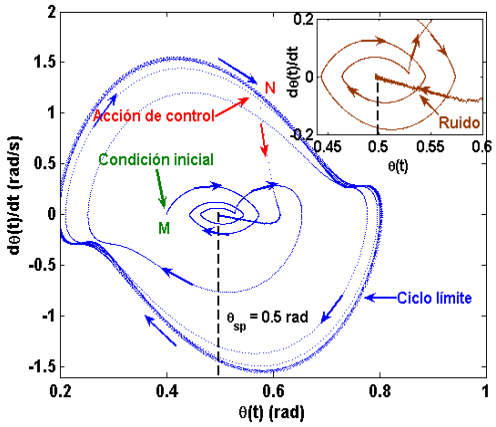


Figura 4:: Tiempo de simulación t = 40 s, intervalo de simulación T = 0.004 s, K_a = 10, ξ = 0.95, $\tau = 3.7969.10^{-3}$ s, K_m = 4.3373 N.m/A, p = 1, f = 10, K_p = 0.9895, τ_i = 0.0721 s, τ_d = 0.004 s, θ_{r1} = 1, θ_{r2} = 0, par de perturbación aplicado en t_p = 10 s, T_{d2} = 10.987 N y ω_p =3.456 rad/s. Condiciones iniciales x_o = [0.3183 0 0 0]. Cambio de valores del regulador PID en t_{con} = 30 s con f = 150, K_{pc} = 14.7881, τ_{ic} = 1.0821 s y $\tau_{dc} = \tau_d$ = 0.004 s. Punto de consigna θ_{sp} = 0.5 rad factor de ruido f_{na} = 0.2.

Para comprobar la validez del diseño, se supone que en el sistema puede estar afectado por ruido aleatorio n(t) tal como se indica en la figura 1 y por tanto las variables de estado toman los valores

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1(t) + f_{na}\left[X - 0.5\right] \\ x_2(t) &= x_2(t) + f_{na}\left[X - 0.5\right] \\ x_3(t) &= x_3(t) + f_{na}\left[X - 0.5\right] \\ x_4(t) &= x_4(t) + f_{na}\left[X - 0.5\right] \end{aligned} \qquad (33)$$

donde X es una variable aleatoria que está uniformemente distribuida entre 0 1 y $f_{na} > 0$ es un factor de amplificación para obtener una amplitud de ruido distribuida uniformemente entre $-f_{na}/2$ y $f_{na}/2$. Como se muestra en la figura 4, primero reeligen valores de K_p, τ_i, τ_d y f para obtener estabilidad asintótica para el punto de consigna elegido que en este caso es θ_{sp} = 0.5 rad. En un instante arbitrario de t_p = 10 s se aplica un par de perturbación externo de la forma: $T_d(t) = 10.987 \sin(3.456t)$ N y el sistema salta a un ciclo límite y se mantiene en él hasta que en el instante t = t_{con} = 30 s el valor del parámetro f se aumenta hasta f = 150. Suponiendo la presencia de ruido definido por las ecuaciones (32) con f_{na} = 0.2 se comprueba que se alcanza el punto de consigna, aún en presencia de ruido.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento dinámico de un servomecanismo de posición con una no linealidad cúbica controlado por un regulador PID. Se pretende estabilizar un cuerpo conectado al eje de salida del servomecanismo que está sometido a un par de perturbación externo.

Debido a la presencia de la no linealidad, se demuestra que en el sistema realimentado con el regulador PID, aparece una bifurcación del tipo Bogdanov-Takens, con una matriz de la parte lineal del sistema con dos autovalores cero. El análisis de la bifurcación, calculando todos los autovalores de la parte lineal, junto con el teorema de la variedad central, permite deducir un sistema simplificado de orden dos, que posee las mismas propiedades dinámicas del sistema original. Este sistema se usa para analizar la estabilidad a partir del segundo método de Lyapunov, lo que permite definir la constante de acción proporcional e integral del regulador PID de forma que el punto de equilibrio sea asintóticamente estable.

El tiempo derivado τ_d junto a la frecuencia de auto-oscilación se han determinado a través de la función descriptiva de la no linealidad cúbica. Además se ha comprobado que variaciones armónicas en la entrada de referencia pueden producir oscilaciones caóticas, las cuales se pueden usar junto con el regulador PID para obtener señales de control muy pequeñas

El correcto funcionamiento del sistema realimentado se ha comprobado suponiendo una perturbación armónica en el eje de salida del servomecanismo que está afectada por ruido aleatorio.

El análisis global del sistema da una visión unificada en donde el control PID, la bifurcación de Bogdanov-Takens, la función descriptiva, el segundo método de Lyapunov y el comportamiento caótico muestran un procedimiento de cómo fenómenos complejos que no son fáciles de interpretar pueden tratarse de forma unificada.

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La metodología presentada en este trabajo se puede extender a sistemas con no linealidades más complejas y con estrategias de control más sofisticadas que pueden dar lugar a comportamientos dinámicos más interesantes.

Referencias

[1] Bogdanov R., Versal deformations of a singular point on the plane in the case of zero eigenvalues, Selecta Math. Soviet.1 (1981) 389–421.

[2] Chiba Hayato, Periodic orbits and chaos in fast–slow systems with Bogdanov Takens type fold points, J. Differential Equations. 250 (2011) 112-160.

[3] Guckenheimer J., Holmes P., Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields. Springer Verlag, New York, 1983.

[4] Khalil K., Nonlinear Systems, second ed., Prentice Hall, New Jersey, 1996.

[5] Kuznetsov Y. A., Elements of Applied Bifurcation Theory, third ed., Springer Verlag, New York, 1998.

[6] Péréz. Polo M, Albertos P.,.Berná Galiano J. A., Tuning of a PID controller gyro using the bifurcation theory, Syst. Control Lett. 57 (2008) 10-17.

[7] Pérez Polo M. F. Pérez. Molina M., Gil Chica J., Stabilization and positioning control of a rolling disk by using the Bogdanov-Takens bifurcation, Physica D. 241 (2012) 1450-1469.

[8] Pérez-Molina M., Pérez-Polo M. F., Steady-state, self-oscillating and chaotic behavior of a PID controlled nonlinear servomechanism by using the Bogdanov-Takens and Andronov-Poincaré_Hopf bifurcations, Commu. Nonlinear Sci. Numer. Simulat., 19 (2014), 3694-3717.

[9] Starzhinskii V. M., Applied Methods in the Theory of Nonlinear oscillations. Mir Publishers, Moscow, 1980

[10] Takens F., Forced oscillations and bifurcations, Comm. Math. Inst. Rijksuniv. Utrecht. 3 (1974) 1–59.

[11] Verduzco F., Alvarez J., Hopf bifurcation control: A new approach, Syst. Control Lett. 55 (2006) 437-451.

[12] Verduzco F., Carrillo F. A., Takens-Bogdanov Bifurcation Analysis in Indirect Field-oriented Control, AIP Conference Proceedings. 1368 (2011) 101-104

[13] Wiggins S., Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, second ed., Springer Verlag, New York, 1990.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.

S. Strahl, A. Husar, J. Riera
Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (UPC/CSIC), C/Llorens i Artigas 4, 08028 Barcelona, Spain
{sstrahl,ahusar,riera} @iri.upc.edu
Ramon Costa Castelló
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
ramon.costa@upc.edu

Resumen

En este trabajo se analiza el modelo de una pila de combustible tipo PEM de cátodo abierto. Se caracterizan sus puntos de equilibrio. Se analiza el plano de fase del modelo alrededor de diferentes puntos de operación y se plantea una linearización del comportamiento del sistema. Finalmente se plantea un diseño basado en control robusto. Este diseño se valida con el modelo completo.

Palabras clave: pila de combustible, control robusto, modelado

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad industrializada depende en gran medida de la energía que actualmente se obtiene principalmente de combustibles fósiles. La demanda energética y las emisiones de carbono, residuo de los combustibles fósiles, han aumentado en los últimos 40 años. Además de la degradación del medio ambiente, la principal preocupación dentro de este contexto corresponde al agotamiento de las principales fuentes de combustibles fósiles. Esta situación ha desatado un gran interés por las fuentes de energía alternativa y sostenible. En las últimas dos décadas se han potenciado y desarrollado diferentes fuentes de energía, destacando entre otras la fotovoltaica y la eólica. Diferentes estudios de la *association of European Renewable Energy Research Centres* (EUREC) realizados en el contexto del Séptimo Programa Marco de Investigación y Desarrollo han demostrado que estas fuentes de energía renovable tienen el potencial necesario para satisfacer la demanda energética actual.

A diferencia de los combustibles fósiles estas nuevas fuentes de energía sostenible no llevan implícitos mecanismos de almacenamiento y presentan el problema de disponibilidad, es decir sólo pueden utilizarse cuando las condiciones medioambientales son las apropiadas. Por ello es importante disponer de mecanismos de almacenamiento que aumenten la disponibilidad energética y faciliten el transporte. Una de las principales tendencias corresponde al uso del hidrógeno como vector energético, éste cumple con las condiciones necesarias, presenta ventajas en comparación con otras fuentes de energía y puede ser producido a partir de fuentes de energía renovable convencionales.

Una de los principales dispositivos de obtención de energía a partir del hidrógeno es el uso de pilas de combustible. Éstas convierten la energía química del hidrógeno directamente en energía eléctrica y calor con un muy elevado rendimiento. Durante los últimos 20 años se han logrado muy importantes avances dentro del ámbito de las pilas de combustible en términos de materiales, diseño de componentes, la producción y la mejora de la densidad de energía del sistema. En la práctica existen diferentes tipos de pilas de combustible, una de las más exitosas corresponde a las pilas de tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Este tipo de pilas funciona a temperaturas relativamente bajas (60 - 80°C) cosa que reduce mucho el coste de los materiales. Además de la baja temperatura este tipo de pilas presentan un tiempo de puesta en marcha bajo, una respuesta transitoria rápida, una alta eficiencia y una importante densidad energética. En términos de éxito comercial las pilas tipo PEM son las líderes del mercado. Las desventajas de las pilas de combustible tipo PEM son su relativamente baja durabilidad y su alto coste debido al uso de platino como catalizador electro-químico.

La temperatura de la pila de combustible tiene un fuerte efecto sobre el contenido de agua en el ionómero de la membrana y las capas catalizadoras: la difusión de agua a través de la membrana, así como la dinámica de absorción de agua del ionómero son función de la temperatura [1, 2, 3]. Los efectos de la temperatura sobre el transporte de agua en las capas catalizadoras se basan en la absorción y desabsorción de agua, así como la evaporación y la condensación en los poros. Como se analizó mediante el modelado en estado estacionario, el contenido de agua en la capa catalizadora tiene un efecto directo sobre el área electroquímicamente activa [4]. Si el agua se evacua de los poros de la capa catalizadora, los protones no pueden llegar a los sitios activos para la reacción electroquímica con los gases reactivos y los electrones, que es el factor clave de rendimiento de la pila de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

combustible PEM.

La gestión óptima de la temperatura/humedad es crucial en las pilas de combustible PEM. Desafortunadamente todavía no está claro cómo controlar adecuadamente la temperatura de un sistema de la pila de combustible y su relación con la eficiencia del sistema. En este trabajo se realiza un análisis basado en modelo de las características de temperatura/humedad y su relación con la potencia generada por el sistema, una caracterización del comportamiento dinámico de la pila y una propuesta de controlador robusto. El trabajo está estructura de la siguiente forma, la sección 2 presenta el sistema bajo estudio, la sección 3 contiene el modelo utilizado para el estudio, la sección 4 analiza los puntos de operación del sistema, la sección 5 analiza el comportamiento del sistema mediante el análisis de su plano de fase, la sección 6 describe el diseño del sistema de control utilizando técnicas de control robusto, la sección 7 muestra el comportamiento del sistema de lazo cerrado y finalmente la sección 8 presenta algunas conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

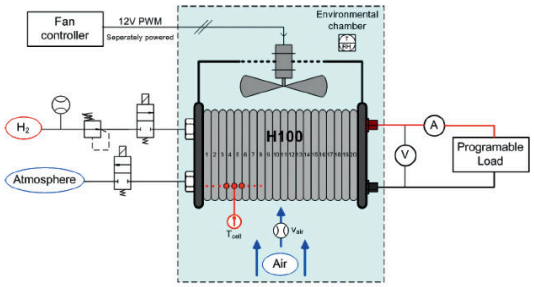


Figura 1: Esquema de una pila de combustible tipo H100.

En este estudio se analizará la pila de combústible (*stack*) comercial H-100 desarrollada por *Horizon Fuel Cells Technologies*, esta está compuesta por 20 celdas y presenta una potencia nominal de 100W. Esta pila es de cátodo abierto y presenta una área activa de $22,5\text{cm}^2$, es auto-humidifica y refrigerado por aire. Incluye un único ventilador de refrigeración directamente unido a la carcasa de la pila de combustible, que refrigera la pila por convección forzada y, al mismo tiempo proporciona oxígeno al cátodo. Por lo tanto, el suministro de aire del cátodo y la pila de refrigeración no se pueden desacoplar.

La figura 1 muestra un esquema del sistema de pila de combustible instalado en una estación de prueba de laboratorio. El ventilador es alimentado mediante fuente de alimentación de 12V externa. Un controlador fija la velocidad de giro del ventilador. La velocidad del aire de entrada de cátodo se mediante un sensor de flujo de aire de alta precisión *E75 de E + E Elektronik*. La entrada del ánodo se alimenta con hidrógeno seco. Un regulador de presión manual mantiene la presión de entrada de ánodo a aproximadamente $0,4$bar.

3. MODELO DEL SISTEMA

En trabajos previos se ha desarrollado un modelo [5] para el sistema descrito en la sección 2. Este està descrito por :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= K_1 \cdot z_1 y + K_1 \cdot z_1^2 + (K_2 \cdot z_2 - K_2 \cdot x_1) u \quad (1) \\ \dot{x}_2 &= K_3 \cdot z_1 - K_4 \cdot f_p(x_1) \cdot x_2 - f_d(x_2) \quad (2) \\ y &= K_5 \cdot x_1 \cdot f_a(x_1, x_2, z_1) \quad (3) \end{aligned}$$

Como se puede observar se trata de un modelo de segundo orden. Los estados corresponden a la temperatura de la pila de combustible (x_1) y la saturación de agua líquida (x_2). La saturación corresponde a la relación del volumen de líquido respecto al volumen total de espacio vacío en la estructura porosa. Por lo tanto la saturación describe el contenido de agua líquida en la capa catalizadora [6]. El sistema presenta 3 entradas, la corriente de carga (z_1), la temperatura ambiental (z_2) y la velocidad de aire (u) del ventilador. Esta última suele usarse como acción de control. La salida del sistema, y, corresponde a la tensión del *stack*. Así la potencia del sistema corresponde a $y \cdot z_1$.

Las ecuaciones (1)-(2)-(3) presentan forma afin, son altamente no lineales pues f_p, f_d y f_a lo son. Además la acción de control está multiplicada por funciones que dependen de los estados.

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE TRABAJO

Con el objetivo de caracterizar los puntos de operación del sistema en esta sección se caracterizan los puntos de equilibrio del sistema (1)-(2)-(3) con el objetivo de simplificar el análisis se aplica el cambio de variable siguiente :

$$u \triangleq \frac{v}{K_2 z_2 - K_2 x_1} \quad (4)$$

donde v puede interpretarse como el intercambio calorífico entre el interior y el exterior. Con este cambio el sistema presenta la forma

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= K_1 \cdot z_1 \cdot y + K_1 \cdot z_1^2 + v \quad (5) \\ \dot{x}_2 &= K_3 \cdot z_1 - K_4 \cdot f_p(x_1) \cdot x_2 - f_d(x_2) \quad (6) \\ y &= K_5 \cdot x_1 \cdot f_a(x_1, x_2, z_1) \quad (7) \end{aligned}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

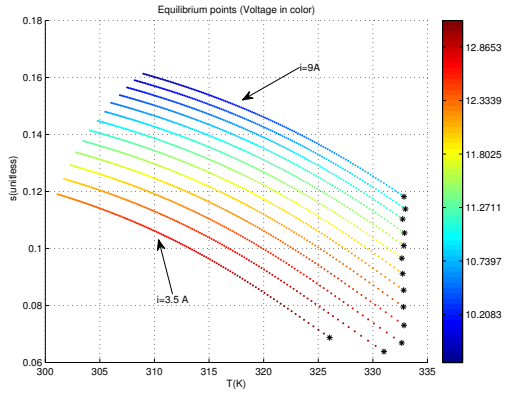


Figura 2: Puntos de equilibrio para diferentes valores de la corriente de carga.

Los puntos de equilibrio (puntos en los que el sistema podrá operar normalmente) pueden obtener igualando a cero $\dot{x}_1$ y $\dot{x}_2$ en las ecuaciones (5) y (6). Dado que el sistema es de segundo orden y existen dos entradas exógenas (z_1,v) para caracterizar los puntos es necesario fijar el valor de la dos entradas, alternativamente es posible fijar alguna de las variables de estado y obtener z_1 o v como solución.

De este análisis se puede obtener los puntos de operación una vez fijada la corriente de carga. La no linealidad de las ecuaciones hace que no sea posible realizar este análisis analíticamente. La Figura 2 muestra los puntos de equilibrio localizados para diferentes valores de la corriente de carga.

Durante este análisis se han ajustado curvas que permiten relacionar las diferentes variables. Así se puede obtener la humedad en función de la temperatura y la corriente:

$$x_2^* = \alpha_{00} + \alpha_{10}x_1^* + \alpha_{01}z_1^* + \alpha_{11}x_1^*z_1^* + \alpha_{02}z_1^2$$

donde $\alpha_{00} = 0{,}714$, $\alpha_{10} = -0{,}002108$, $\alpha_{01} = 0{,}00411$, $\alpha_{11} = 4{,}063e-05$ y $\alpha_{02} = -0{,}0006086$.

Adicionalmente es posible obtener el valor de la acción de control (v) necesaria para una temperatura y un corriente :

$$v^* = \beta_{00} + \beta_{10}x_1^* + \beta_{01}z_1^* + \beta_{11}x_1^*z_1^* + \beta_{02}z_1^2 \quad (8)$$

donde $\beta_{00} = 0{,}0326$,$\beta_{10} = -9{,}593e-05$,$\beta_{01} = -0{,}06164$, $\beta_{11} = 0{,}0001137$, $\beta_{02} - 0{,}0009065$. Esta relación puede ser utilizada a modo de *feedforward* en el sistema de control.

Normalmente los rangos de las diferentes variables son, la temperatura exterior,z_2, suele estar en el intervalo $[278, 308]$K, la corriente de carga, z_1, puede moverse en el intervalo $[0, 8]$A, la velocidad del aire, u, toma sus valores en el rango $[0{,}1, 1]$m/s, la saturación, de agua líquida, x_2 está definida en el intervalo $[0{,}01, 0{,}8]$ y finalmente la temperatura de la pila suele estar en el intervalo $[z_2, 333]$K.

5. COMPORTAMIENTO DINAMICO

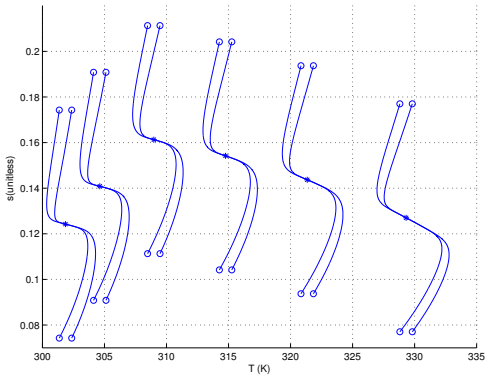


Figura 3: Plano de fases para diferentes puntos de operación.

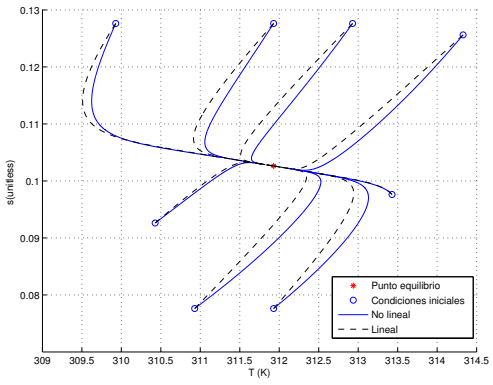


Figura 4: Comparación del plano de fase lineal respecto al no lineal.

Las ecuaciones (5)-(6) que describen el funcionamiento del sistema son muy complejas, cosa que dificulta notablemente en análisis analítico. Por dicho motivo se ha planteado un análisis numérico de su comportamiento. Aunque su complejidad es importante su orden es bajo cosa que permite representar gráficamente su plano de fase. A modo ejemplo la Figura 3 muestra la evolución del sistema alrededor de varios puntos de equilibrio para v y z_1 constante. Como se puede observar su comportamiento es estable en todos ellos y bastante parecido. Las trayectorias del sistemas recuerdan a las que presentaría un sistema lineal con dos polos reales en semiplano izquierdo[7].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La figura 4 muestra sobre el plano de fase la evolución del sistema (5)-(6) y la de un sistema lineal obtenido vía linealización alrededore de un punto de equilibrio [7] del sistema (5)-(6) para diferentes condiciones iniciales manteniendo v y z_1 constantes. Como se puede observar las trayectorias son bastante parecidas, ello hace indicar que pese a su complejidad el sistema puede ser fácilmente aproximado por un sistema lineal.

6. DISEÑO DE UN CONTROLADOR

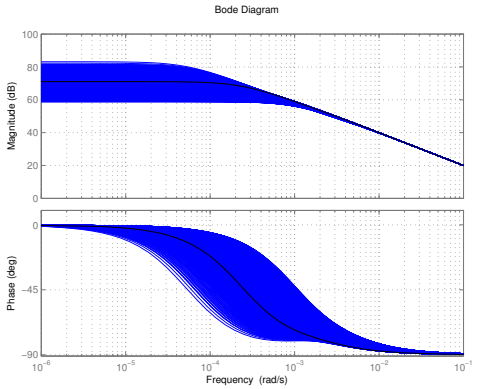


Figura 5: Diagrama de Bode de los diferentes modelos lineales obtenidos alrededor de los puntos de equilibrio.

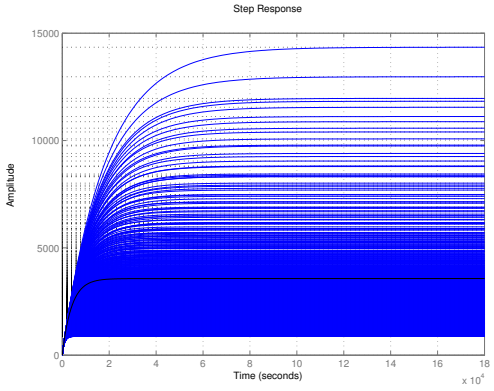


Figura 6: Respuesta al escalón de los diferentes modelos lineales obtenidos alrededor de los puntos de equilibrio.

En la sección anterior se ha visto que el sistema (5)-(6) puede ser descrito por un sistema lineal y que el comportamiento dinámico es bastante similar en todos los puntos de equilibrio caracterizados. Por dicho motivo parece razonable pensar que un único controlador lineal puede regular adecuadamente el comportamiento del sistema. Por dicho motivo se analiza la respuesta temporal y frequencial de los diferentes modelos lineales obtenidos en los puntos de equilibrio mostrados en la Figura 2. La Figura 6 muestra la respuesta temporal de los diferentes modelos, puede observarse que pese a ser sistemas de segundo orden presentan una respuesta al escalón muy similar a las los sistemas de primer orden, aunque la forma es parecida existe un variación importante en la ganancia de continua de los diferentes sistemas. La Figura 5 muestra la respuesta frecuencia de los diferentes modelos, nuevamente se visualiza la variación de la ganancia y se visualiza también los cambios en la fase y las frecuencias de corte. Con el objetivo de modelar esta variabilidad se plantea un sistema lineal con incertidumbre multiplicativa (Figura 7). Como modelo nominal se ha elegido el sistema:

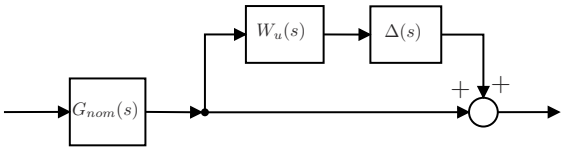


Figura 7: Esquema de bloques del modelado mediante incertidumbre multiplicativa.

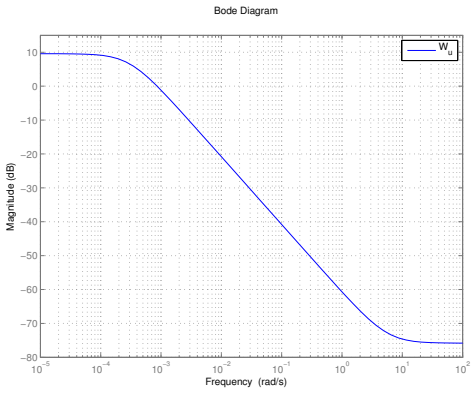


Figura 8: Magnitud de la incertidumbre ($W_u(s)$).

$$G_{nom}(s) = \frac{s + 0{,}001567}{(s + 0{,}001794)(s + 0{,}0002448)}$$

y como función de pesado ha sido suficiente elegir una función de primer orden (Figura 8) :

$$W_u(s) = \frac{0{,}00016194(s + 5{,}631)}{s + 0{,}0003025}$$

Una vez disponemos de este modelo parece natural utilizar unas especificaciones de prestaciones basadas en el moldeado de la función de sensibilidad y un posterior ajuste mediante H_∞ o μ-síntesis [8].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

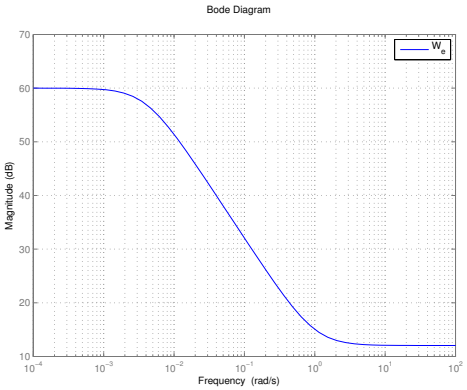


Figura 9: Respuesta frecuencial de la función de pesado de la función de sensibilidad ($W_e(s)$).

Como especificaciones de las prestaciones se usa la función de pesado

$$W_e(s) = \frac{0{,}01(s+100)}{s+0{,}1}$$

cuya magnitud se muestra en la Figura 9. Esta función garantiza un error de seguimiento inferior al 10 % dentro de la banda pasante deseada.

Observando la Figura 8 y la Figura 9 se puede observar que tanto la función de prestaciones y la de incertidumbre presentan alta ganancia en baja frecuencia. Ello es contradictorio desde el punto de vista de la formulación del problema de control, por ello una resolución directa con este planteamiento ya sea vía H_∞ o μ-síntesis[8] difícilmente generaría resultados satisfactorios.

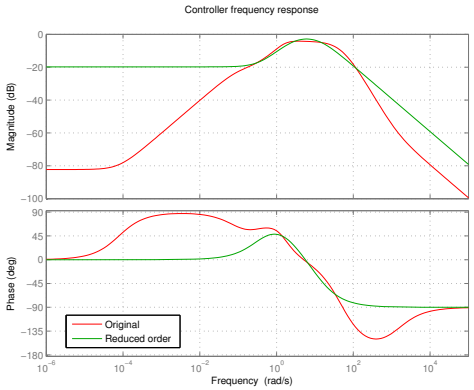


Figura 10: Respuesta frecuencial de los controladores obtenidos (sin incluir el integrador.

Pese a que la incertidumbre en ganancia es elevada en baja ganancia, ésta difícilmente será causa de inestabilidad pues la fase en dichas frecuencias es próxima a cero. Este tipo de razonamiento no pue-

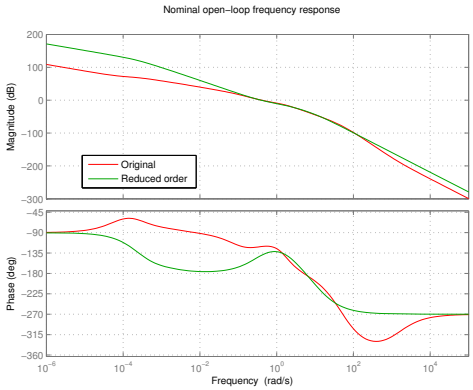


Figura 11: Respuesta frecuencial del sistema nominal de lazo abierto.

de ser aplicado con un modelo con incertidumbre no estructurada. Por dicho motivo el modelo de no incertidumbre no estructura descrito en la Figura 8 se substituye por un modelo de incertidumbre estructurada[8] de la forma:

$$W_u'(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

con $k \in [1{,}3{,}16]$ y $\tau \in [0{,}000455, 0{,}00105]$. Los parámetros de la incertidumbre se han obtenido de la observación de la Figura 5. Con este tipo de incertidumbre es susceptible de ser tenida en cuenta en un proceso de μ-síntesis.

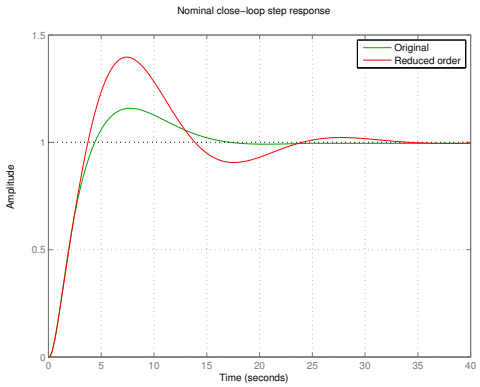


Figura 12: Respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado nominal.

De forma previa y con el objetivo de garantizar error estacionario nulo en el seguimiento de escalones se ha añadido un integrador en serie a la planta. Posteriormente este integrador pasará a formar parte del controlador obtenido.

Para obtener el controlador se ha utilizado MATLAB y la *Robust Control Toolbox*[9]. El proceso de μ-síntesis ha generado un controlador de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

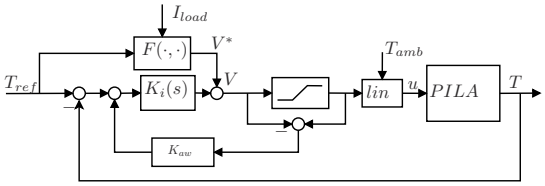


Figura 13: Esquema completo del sistema de control.

orden 10. Dicho controlador se ha considerado de orden demasiado elevado, por dicho se ha realizado una redución de orden del controlador basada en la observación de sus valores singulares de Hankel [8]. Un controlador de segundo orden se ha considerado una buena aproximación del controlador inicial. Mediante el comando robuststab de la *Robust Control Toolbox*[9] se ha podido comprobar que ambos controladores generan un controlador robustamente estable.

La Figura 10 muestra la respuesta frecuencial del controlador original y el de orden reducido. Como se puede observar el de orden reducido presenta una estructura mucho más simple. El orden reducido presenta más ganancia en baja frecuencia, cosa que en principio es deseable y también en alta frecuencia, en principio poco deseable. Pero pese a ello la ganancia es pequeña y por tanto no amplificará el ruido de medida. La Figura 11 muestra la respuesta frecuencial del sistema de lazo abierto nominal, las componentes de ganancia son bastante similares mientras que las de fase difieren un poco más en las frecuencias centrales, pese a ello la fase mantiene en intervalos razonables en ambos casos. Finalmente la Figura 12 muestra la respuesta al escalón de los dos sistema de lazo cerrado nominales, ambos sistemas presentan un tiempo de establecimiento similar pero como se puede observar el sistema con el controlador de orden reducido presenta un sobrepico mayor. Pese a ello en este trabajo se utilizará el controlador de orden reducido.

7. VALIDACIÓN

El controlador propuesto está compuesto por la linealización parcial descrita por la ecuación (4), el controlador lineal, $K(s)$, obtenido en la sección anterior, un elemento de feedforward, $F(\cdot,\cdot)$, consistente en la ecuación (8) encargada de fijar los valores de estacionario ideales y una realimentación antiwindup encargada de gestionar la saturación de la acción de control.

A efectos de implementación, el controlador se ha discretizado con un período de muestreo de 0,0,1s.

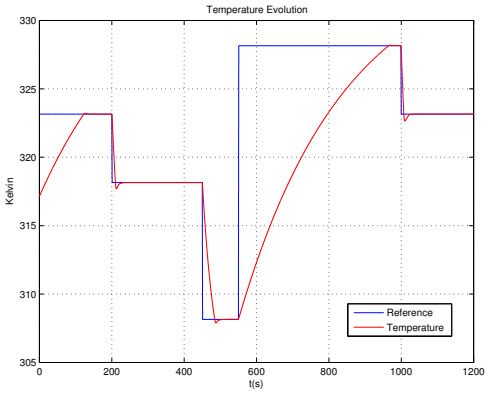


Figura 14: Respuesta temporal del sistema de lazo cerrado.

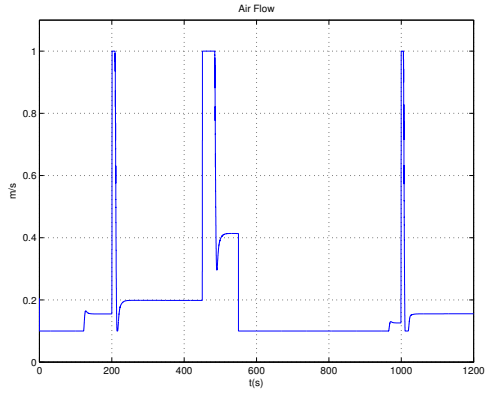


Figura 15: Acción de control del sistema de lazo cerrado.

La Figura 14 muestra la evolución del sistema de lazo cerrado compuesto por el sistema no lineal utilizado como punto de partida. En las simulaciones se ha asumido una corriente constante de 4A y una temperatura ambiente de 298K y está sujeta a todas las restricciones del sistema real. Como se puede ver el sistema de control sigue perfectamente la referencias de temperatura con un ligero sobrepico en algunos casos. De forma similar la Figura 15 muestra la acción de control aplicada, puede observar está satura en algunos instantes, después del cambio de consigna, pero enseguida se recupera. Por todo ello puede considerar-se que el controlador es satisfactorio.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo ha presentado el diseño de un sistema de control de temperatura para una pila tipo PEM de cátodo abierto. El diseño desarrolla una metodología que puede ser utilizado en otro tipo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de pilas y dispositivos similares, éste tiene en cuenta la naturaleza no lineal del sistema a la vez que genera un controlador de estructura sencilla y con rendimiento satisfactorio.

En la actualidad se está trabajando para validar experimentalmente el comportamiento del sistema de control. Paralelamente se está trabajando en la mejora del modelo del sistema con el objetivo de utilizarlo para obtener los puntos de trabajo óptimos para una potencia deseada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos MICINN DPI2011-25649 y PUMA-MIND FP7 303419.

Referencias

[1] Stephan Strahl, Attila Husar, and Maria Serra. Development and experimental validation of a dynamic thermal and water distribution model of an open cathode proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 196(9):4251 – 4263, 2011.

[2] Stephan Strahl, Attila Husar, and Alejandro A. Franco. Electrode structure effects on the performance of open-cathode proton exchange membrane fuel cells: A multiscale modeling approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(18):9752 – 9767, 2014.

[3] Paul W. Majsztrik, M. Barclay Satterfield, Andrew B. Bocarsly, and Jay B. Benziger. Water sorption, desorption and transport in nafion membranes. *Journal of Membrane Science*, 301(1–2):93 – 106, 2007.

[4] Qianpu Wang, Michael Eikerling, Datong Song, and Zhongsheng Liu. Structure and performance of different types of agglomerates in cathode catalyst layers of pem fuel cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 573(1):61 – 69, 2004.

[5] S. Strahl, A. Husar, P. Puleston, and J. Riera. Performance improvement by temperature control of an open-cathode pem fuel cell system. *Fuel Cells*, pages 1–3, 2014.

[6] Ugur Pasaogullari and CY Wang. Liquid water transport in gas diffusion layer of polymer electrolyte fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 151(3):A399–A406, 2004.

[7] H. K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 3. edition edition, 2002.

[8] Ricardo S. Sánchez-Peña and Mario Sznaier. *Robust Systems Theory and Applications*. Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series. Wiley-Interscience, August 1998.

[9] Gary Balas, Richard Chiang, Andy Packard, and Michael Safonov. *Robust Control Toolbox. User's Guide. R2012a*. Mathworks, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

APLICACIONES EN MATLAB Y SIMULINK PARA EL MODELADO Y CONTROL DEL MOVIMIENTO DE UNA ESTACIÓN ABB IRB-120

Miguel Mato, Alberto Herreros
ITAP (Universidad de Valladolid), {ma_mato@hotmail.com, albher@eii.uva.es}
Juan Carlos Fraile, José Luis González, Enrique Baeyens, Javier Peréz Turiel, Fernando Gayubo
ITAP (Univ. Valladolid)-CARTIF (Parque Boecillo), {jcfraile,jossan,enrbae,turiel,fergay@eii.uva.es}

Resumen

La programación de robots hace uso de herramientas de simulación que reproducen fielmente la dinámica del robot y permiten diseñar los programas de forma sencilla y eliminar errores antes de proceder a su verificación sobre el robot. En el mundo académico MATLAB es un entorno de cálculo y visualización cada vez más extendido, por lo que es muy interesante poder disponer de una herramienta desarrollada sobre MATLAB que permita programar y controlar un robot. En este artículo se presenta un conjunto de aplicaciones, desarrolladas con fines didácticos sobre MATLAB y SIMULINK, que permiten visualizar un robot ABB IRB-120 en tres dimensiones y poder diseñar y controlar su trayectoria. Los movimientos del robot se controlan directamente por medio de comunicaciones OPC entre el servidor de ABB y el cliente de MATLAB. La herramienta dispone de un entorno gráfico que facilita su utilización.

Palabras clave: Robótica, Docencia, Simulación

1. INTRODUCCIÓN

Las asignaturas relacionadas con robótica tienen dos objetivos que no siempre son fáciles de combinar. Por un lado, se pretende proporcionar al alumno las bases teóricas de la robótica, entre ellas se explica los sistemas de coordenadas, las trayectorias, la cinemática y dinámica del robot y el control del mismo, [6, 17, 19, 18]. Por otro lado, se desea que el alumno aprenda a programar un robot real, con sus lenguajes particulares, por ejemplo RAPID para robot ABB, [5, 4].

Una solución intermedia para combinar ambos objetivos es el uso de las aplicaciones de MATLAB y SIMULINK para robótica, donde de una forma práctica se puede aplicar y visualizar la teoría en robots simulados o reales. La aplicación "Robotic Toolbox" desarrolla algoritmos teóricos para modelado de robots, estudio de cinemática, dinámica y trayectorias sobre un robot genérico [7, 8]. La aplicación "ARTE" ("A Robotic Toolbox for Education") [10] añade a la anterior aplicación el modelo en tres dimensiones (3D) de un gran número de robot industriales, con funciones para obtener sus cinemáticas inversas, de forma que los conceptos teóricos pueden ser aplicados a robots industriales.

El Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP) dispone desde el año pasado de un robot ABB IRB-120 [2], el menor de su serie, para uso puramente educacional. El objetivo es enseñar al alumno la teoría de robótica y la programación del robot en RAPID. Para integrar ambos objetivos, se ha desarrollado una serie de aplicaciones, basadas en las aplicaciones de MATLAB antes citadas [10, 8]. Las aplicaciones realizadas conseguirán que el alumno pueda comprender la teoría con la herramienta de trabajo que luego va a emplear. Se han realizado pantallas para la visualización del robot en 3D, una aplicación gráfica basada en GUIDE de MATLAB [13], y simulaciones del robot en 3D basadas en SimMechanic [14, 15, 16].

Un objetivo didáctico de gran interés es el control del movimiento del robot desde las aplicaciones desarrolladas en Matlab. Para ello, se ha estudiado distintas formas de comunicación entre el PC con las aplicaciones de Matlab y el robot ABB. La aplicación empleada está basada en el servidor OPC que dispone ABB [1] y el OPC cliente de Matlab [12]. Dicha aplicación permite, para un periodo de muestreo dado, mostrar y modificar las variables de salida y permanentes del robot desde una aplicación OPC cliente.

Se consideran seis variables de salida en la estación robotizada, una para cada eje del robot. Estas variables serán leídas por el OPC servidor y modificadas desde Matlab por una aplicación OPC cliente. En la función de visualización en 3D del robot se ha añadido la opción de modificar de forma simultanea el valor de estas variables para definir la posición de los ejes. El procedimiento que el robot ejecuta en su propio lenguaje RAPID lee de forma ininterrumpida las seis variables de los ejes, y se mueve a la posición correspondiente. De esta forma se consigue que la trayectoria del ro-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

bot sea controlada por la aplicación de MATLAB, y que robot y su modelo en 3D sigan la misma trayectoria de forma simúltanea.

El alumno podrá aplicar esta herramienta tanto en la estación virtual representada con RobotStudio [4] como en la real, ya que el servidor OPC es válido para ambas estaciones. El alumno puede analizar y validar su programa de control en la estación virtual, y cuando esté convencido de su funcionamiento ejecutarla y verificarla en el robot real. En cualquier caso, la aplicación es válida para poder ser aplicada con el robot en modo manual en condiciones de máxima seguridad, ya que si se suelta la tecla de hombre muerto, el robot se para automáticamente. Las pequeñas dimensiones del robot IRB-120 permiten este tipo de manipulación sin peligro para el alumno. Éste fue el principal argumento para adquirir el citado robot.

El resto del artículo tiene la siguiente estructura, en la sección 2 se analiza las aplicaciones en Matlab y SIMULINK relacionadas con robótica. En la sección 3, se analiza las posibles comunicaciones entre un robot ABB y un PC. En la sección 4, se detallan las aplicaciones realizadas en MATLAB y SIMULINK, y en la sección 5 se citan las conclusiones del artículo.

2. SISTEMAS ROBOTIZADOS EN MATLAB Y SIMULINK

MATLAB y SIMULINK son dos entornos de cálculo numérico y visualización de datos de la compañía Matworks ([11], [14]), con grandes posibilidades para el diseño de sistemas dinámicos y su simulación. Dentro de las aplicaciones comerciales de ambos entornos no existe uno específico para el diseño y simulación de sistemas robotizados, pero diversos autores han desarrollado aplicaciones de software libre usando MATLAB y SIMULINK para sistemas robotizados.

La aplicación de robótica más conocida para MATLAB y SIMULINK es "Robotic Toolbox" realizada por Peter Corke [8] y que desarrolla los contenidos del libro del propio autor [7]. Dicha aplicación dispone de software para robótica fija y móvil. En la parte de robótica fija propone algoritmos para modelar un robot usando el método de Denavit-Hartenberg, con los que se puede obtener la cinemática directa del robot. La aplicación propone un método general de cinemática inversa para un robot con muñeca esférica, que puede ser aplicada a robots PUMA. Los modelos gráficos de los robots son muy simples, pero genéricos, ya que se representan únicamente los ejes y las uniones entre ellos. En la última versión se ha desarrollado un modelo 3D para el robot PUMA. La dinámica de los robot se representa mediante bloques convencionales de SIMULINK.

La mayoría de los fabricantes de robot industriales han desarrollado modelos gráficos en 3D utilizando programas de diseño asistido por ordenador (CAD), y estos modelos en muchos casos son libres y se pueden obtener de internet. Del archivo del robot en los principales formatos de CAD se puede pasar a una estructura compuesta por un fichero "`*.xml`" con los datos del robot y ficheros "`*.stl`" con la información gráfica de cada brazo del robot. Existen aplicaciones de MATLAB para leer la información de los ficheros "`*.stl`" y obtener gráficas en 3D de los brazos del robot en MATLAB.

La aplicación "ARTE" ("A Robotic Toolbox for Education") [10] aprovecha estos ficheros para generar modelos de los principales robot del mercado. Esta aplicación dispone de la cinemática directa, basada en Denavit-Hartenberg, e inversa de un conjunto de robots. También dispone de datos dinámicos de alguno de estos robots. Con ello se puede estudiar los movimientos y trayectorias de un robot industrial viendo su evolución sobre modelos gráficos de 3D. Además, esta aplicación dispone de algoritmos similares a las instrucciones de movimiento del lenguaje RAPID, para comprender la forma en la que se diseñan estas funciones y su aplicación a robot industriales.

La aplicación gráfica ROKISIM (Robot Kinematic Simulation) [9] muestra un modelo gráfico en 3D de muchos robots industriales y simula sus movimientos básicos.

La aplicación comercial SimMechanic [15] para SIMULINK dispone de una herramienta especial, SimMechanic Link [16], que permite importar modelos de robot realizados con programas de CAD donde la información de su estructura está en ficheros "`*.xml`" y la información sobre sus brazos en ficheros "`*.stl`". A partir de esta información, la aplicación desarrolla un modelo SIMULINK (SimMechanic) con la estructura en serie articulación-brazo del robot y un modelo gráfico en 3D con la figura del robot. Sobre el diagrama de SIMULINK se pueden hacer cambios para simular los lazos de control de cada brazo del robot y de esta forma, simular la dinámica del mismo.

Se concluye indicando que existen muchas aplicaciones para modelar y simular un robot fijo usando MATLAB y SIMULINK. Algunas son genéricas para cualquier tipo de robot definido con el método de Denavit-Hartenberg y otras aprovechan los modelos de CAD de robot industriales para estudiar la cinemática y dinámica de robot concretos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3. COMUNICACIÓN DE LA APLICACIÓN CON EL ROBOT

El objetivo de este trabajo es el modelado y simulación con MATLAB y SIMULINK del robot ABB IRB-120 para diseñar trayectorias desde MATLAB que serán seguidas por el robot real.

La comunicación entre la aplicación de MATLAB y el robot de ABB se podría haber realizado usando múltiples protocolos. La ventajas e inconvenientes de dos de ellos se resumen a continuación:

- **Comunicación por socket:** El lenguaje RAPID dispone la posibilidad de comunicarse a través de socket vía local o internet. Este método implica crear una subtarea o interrupción en el programa de RAPID que en cada periodo de muestreo se conecte con el socket y se comunique con el exterior. Es preciso sincronizar el proceso de lectura y escritura entre el robot y su entorno lo que hace que este protocolo sea poco robusto.

- **Comunicación por OPC:** ABB dispone de un servidor OPC que puede ser ejecutado desde un PC. Esta aplicación detecta los robots de ABB conectados al PC, ya sean reales o virtuales, y extrae de ellos, en cada periodo de muestreo fijado, la información del sistema, sus variables de entradas y salidas, y las variables persistentes del programa RAPID del robot. Desde una aplicación OPC cliente se puede leer y modificar dichas variables. No es preciso que la lectura y escritura estén sincronizadas, cuando se modifique una variable desde el exterior, dicha variable queda modificada en la estación del robot.

La comunicación entre la aplicación de MATLAB y el robot de ABB ha sido realizada haciendo uso del servidor OPC proporcionado por ABB [1], y del cliente OPC proporcionado por la aplicación "OPC Toolbox" de MATLAB [12]. La comunicación se ha realizado usando variables de salida analógicas virtuales por una razón de seguridad. La escritura en variables de salida en RAPID es posible en estado manual y automático, mientras que la escritura en variables persistente sólo es posible en automático. Con fines educativos y por seguridad, el robot IRB-120 se suele usar en modo manual, ya que en este modo se puede parar el robot ante cualquier eventualidad dejando de pulsar el botón de hombre muerto. Se han definido seis variables de salida virtuales normalizadas entre $[-100, 100]$ para transmitir la información de los seis ejes del robot.

La forma de comunicarse entre MATLAB y la estación IRB-120 es la siguiente:

- **MATLAB:** Cuando la aplicación de MATLAB quiera cambiar la posición del robot debe modificar el valor de las variables del servidor OPC correspondientes a los ejes del robot.

- **Estación IRB-120 (RAPID):** El programa en RAPID consiste en un bucle infinito que lee las salidas analógicas correspondientes a los ejes y desplaza al robot a la posición definida por los valores de las variables.

El protocolo que se han empleado proporciona independencia frente al tiempo de lectura y escritura. Si se envía una trayectoria definida por muchas posiciones de ejes con un periodo de muestreo muy bajo, puede que el programa RAPID no sea capaz de leer algún punto pero llegará al destino sin quedarse bloqueado. La sincronización entre MATLAB y RAPID depende de la velocidad con que MATLAB envía los datos a las variables de salida del robot.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS APLICACIONES: EJEMPLOS

Se han desarrollado tres aplicaciones para modelar y simular un robot IRB-120 con MATLAB y conseguir mover el robot real, o virtual si se prefiere, con la misma trayectoria que el robot simulado. Las dos primeras aplicaciones hacen uso de las funciones de "Robotic Toolbox" [8] y "ARTE" [10]. La tercera aplicación, sin embargo, hace uso de las herramientas de SimMechanic [15, 16].

4.1. Aplicación gráfica de simulación

El objetivo de esta aplicación es modelar un robot IRB-120, con su cinemática directa e inversa y programar una función para visualizar las posiciones del robot en 3D. La cinemática directa y las trayectorias del robot se han diseñado utilizando la aplicación de [8], mientras que la cinemática inversa ha sido obtenida de la aplicación de [10]. A partir de los ficheros "`*.stl`" del robot, se ha construido una función `plot_irb120()` con las siguientes objetivos:

- Dibujar el robot en 3D con la posición de ejes deseada. Se puede dibujar una secuencia de posiciones si la entrada es una matriz de posiciones de ejes. Se puede definir un tiempo de parada entre posiciones que va a ser útil para sincronizar el movimiento de la gráfica y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

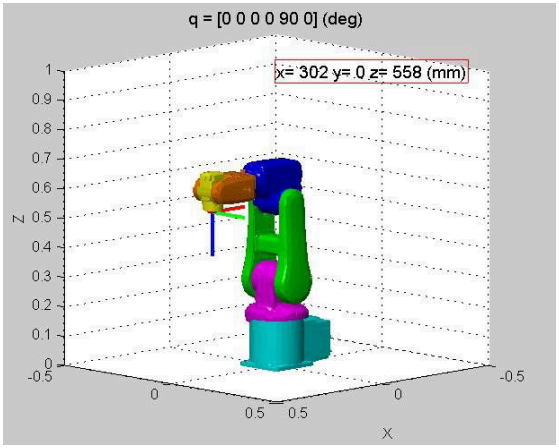


Figura 1: Robot IRB-120 en 3D

el del robot real. La figura 1 muestra el robot simulado en la posición $q_0 = [0, 0, 0, 0, \pi/2, 0]$.

- El usuario puede escribir dicha posición en las variables de entrada de la estación correspondiente, usando el servidor OPC de ABB, .

- Cuando el programa de RAPID se activa, el robot irá moviéndose a las mismas posiciones que el robot simulado. El tiempo de espera entre posiciones es un parámetro de sintonización entre el robot y la simulación.

Un ejemplo sencillo de esta aplicación es el movimiento del robot de una posición de ejes $q0$ a $q1$, iterando los puntos intermedios.

```
%Se define el robot
robot= mdl_irb120;
%Busca los variables en el OPC server
items= OPCJoint;
%Interpola las posiciones de ejes
q0= [0,0,0,0,0,0]; q1=[10,20,30,40,50]*pi/180;
t= 0:0.1:1; q= jtraj(q0,q1,t);
%Se mueve la gráfica y robot real
opt.items= items
plot_irb120(q, robot, opt);
```

El programa de RAPID del robot sólo lee las variables de salida correspondiente a las posiciones de los ejes y mueve el robot adecuadamente.

```
PROC mov_opc_joint()
    VAR jointtarget joint;
    TPwrite "Inicio Espera";
    WHILE true DO
    ! Leer variable y mover a donde
        corresponda
      joint:= Read_Joint_ibr120();
      MoveAbsJ joint, v100, fine,
          electroiman;
    ENDWHILE
ENDPROC
```

La figuras 2 y 3 muestran la posición inicial y final del movimiento.

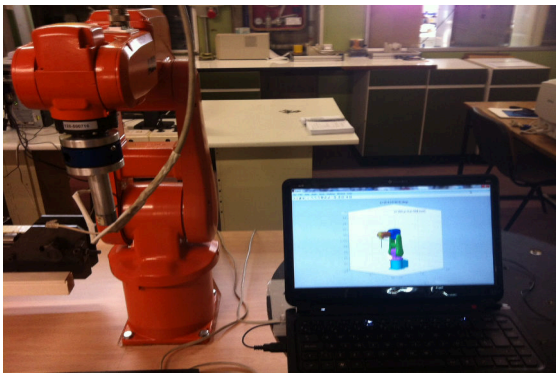


Figura 2: Posición inicial del robot **q0**

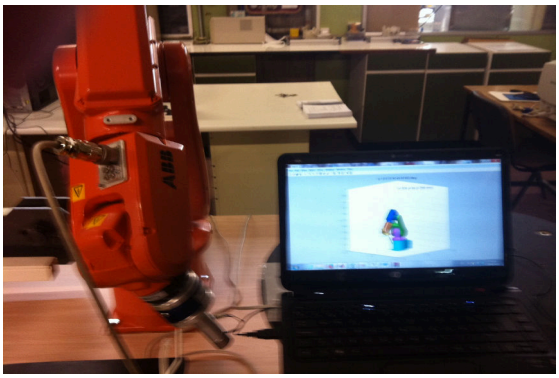


Figura 3: Posición final del robot **q1**

4.2. Aplicación gráfica (GUIDE) para el movimiento de la estación

A partir de la función `plot_irb120()` se ha realizado una aplicación gráfica en GUIDE de MATLAB [13] que permite al usuario realizar de forma sencilla movimientos de ejes por ángulos y posiciones cartesianas. Dichos movimientos se visualizan con la función `plot_irb120()` y podrán ser enviadas a las variables de los ejes del robot a través del servidor OPC. Con ello, el usuario podrá mover el robot con una aplicación gráfica de MATLAB, de forma similar a como se mueve con la aplicación FlexPendant de ABB [3].

Las principales características de esta aplicación son la siguientes:

- Movimiento a una posición en coordenadas articulares. Se puede grabar dicha posición para simular una trayectoria.

- Movimiento a una posición del punto de trabajo. Se puede grabar dicha posición para simular una trayectoria.

- Movimiento del robot entre las posiciones grabadas anteriormente, ya sean posiciones articulares o del punto de trabajo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Movimientos de demostración del robot.
- Conexión con OPC para comunicar datos.

La figura 4 muestra la pantalla inicial de la aplicación gráfica. Se aprecian los diferentes botones para mover el robot mediante coordenadas articulares, coordenadas de punto de trabajo, y resto de elementos mencionados.

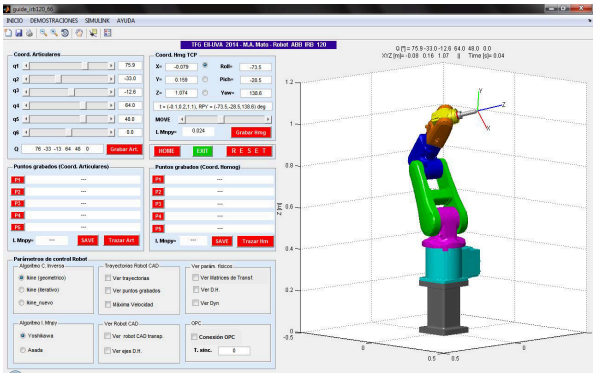


Figura 4: Aplicación gráfica para mover el robot

4.3. Simulación de la dinámica de la estación

A partir del modelado del robot IRB-120 con un programa de CAD se puede extraer la información de su estructura a un fichero "`*.xml`" y la información de las gráficas de sus brazos a ficheros "`*.stl`".

Se ha realizado un modelo con la herramienta SimMechanic [15] de SIMULINK [16] importado a partir del modelo de CAD. Con este modelo se pueden diseñar los controladores del robot.

4.4. Posibles aplicaciones didácticas

El objetivo de las aplicaciones realizadas en este artículo es servir de puente entre el estudio matemático de los sistemas robotizados y el práctico de movimiento real de un robot comercial. Se desea que el alumno pueda realizar algoritmos semejantes a los implementados en lenguaje RAPID y otros algoritmos nuevos que él desarrolle.

Como ejemplos de ejercicios realizables con estas aplicaciones se pueden citar:

- Modelar trayectorias interpolando puntos en el espacio de coordenadas auriculares.
- Modelar trayectorias interpolando puntos en el espacio de coordenadas espaciales del punto de trabajo.
- Mover el punto de trabajo del robot para minimizar el error entre la posición de dicho punto y una referencia dada, usando un algoritmo de optimización local. Usar para ello incrementos en las coordenadas auriculares.
- Mover el punto de trabajo del robot en la dirección medida por un sensor de esfuerzos, que el robot IRB-120 tiene en una de sus herramientas.
- Mover el punto de trabajo del robot hacia una posición móvil detectada por una cámara de visión asociada a una aplicación de Matlab.

5. CONCLUSIONES

Se han presentado un conjunto de aplicaciones didácticas desarrolladas sobre MATLAB y SIMULINK para controlar el movimiento de un robot real ABB IRB120. El objetivo es que el alumno pueda realizar sus propios programas desde MATLAB y pueda ver como con ellos se controla la trayectoria de un robot real. La herramienta de comunicación entre el robot y las aplicaciones de MATLAB es un simple intercambio de información usando el servidor OPC de ABB y el cliente OPC de MATLAB. Se consigue un movimiento sincronizado entre el modelo gráfico 3D del robot visualizado en MATLAB y el movimiento real del robot. Con esta herramienta se pretende que el alumno desarrolle funciones en MATLAB similares a las instrucciones reales de RAPID del robot, para comparar los algoritmos desarrollados por el alumno con los obtenidos con las funciones del lenguaje RAPID y así fijar los conocimientos aprendidos en las clases de robótica.

Referencias

[1] ABB robotic. Application manual: IRC5 OPC Server. Doc. ID: 3HAC023113-001.

[2] ABB robotic. Manual del producto: IRB 120-3/0.6, IRB 120T-3/0.6. Doc. ID: 3HAC035728-005.

[3] ABB robotic. Manual del operador IRC5 con FlexPendant. Doc. ID: 3HAC16590-5.

[4] ABB robotic. Manual del operador: RobotStudio. Doc. ID: 3HAC032104-005.

[5] ABB robotic. Manual del operador: Introducción a RAPID (RobotWare 5). Doc. ID: 3HAC029364-005

[6] Barrientos A., Peñin L.F., Balaguer C. y Aracil P. (2007) Fundamentos de Robótica (2 edición), MacGraw-Hill.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[7] Corke, P. (2013) Robotics, Vision & Control, Springer.

[8] Peter Corke (2014) Robotics Toolbox. *http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html*.

[9] Bonev I. (2013) ROKISIM (Robot Kinematic Simulation), Escuela de Superior de Tecnología(Quebec, Cadana) *http://www.parallemic.org/RoKiSim.html*.

[10] Gil Aparicio A. (2014) ARTE (A Robotics Toolbox for Education) Universidad Miguel Hernandez (Elche, España), *http://arvc.umh.es/arte/index_en.html*.

[11] MathWorks (2014). MATLAB User's Guide.

[12] MathWorks (2014). OPC Toolbox User's Guide.

[13] MathWorks (2014). GUIDE Toolbox User's Guide.

[14] MathWorks (2014). SIMULINK User's Guide.

[15] MathWorks (2014). SimMechanic User's Guide.

[16] MathWorks (2014). SimMechanic Link User's Guide (2014).

[17] Ollero A. (2001) Robótica, manipuladores y robots móviles, Editorial Marcombo.

[18] Perez Cisneros M.A., Cuevas Jimenez E.V., Zaldivar Navarro D. (2014) Fundamentos de Robótica y Mecatrónica con MATLAB y SIMULINK. Editorial RA-MA.

[19] Spong M., Hutchinson S y Vidyasagar (2006) M., Robot, Modeling & Control, Wiley.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DISEÑO DE UN ASISTENTE CAMARÓGRAFO PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA DE PUERTO ÚNICO

I. Rivas-Blanco, B. Estebanez, M. Cuevas-Rodríguez, I. García-Morales, V.F. Muñoz
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Andalucía Tech
Universidad de Málaga, vfmm@uma.es

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un asistente robótico camarógrafo para técnicas de cirugía laparoscópica de puerto único. El asistente, que tiene por objeto solventar los principales inconvenientes de este tipo de técnicas, está formado por un mini-robot cámara y un brazo robótico externo para su guiado a lo largo de la pared abdominal. El mini-robot se introduce en la cavidad abdominal a través del puerto de entrada de las herramientas quirúrgicas y se adhiere a la pared abdominal mediante interacción magnética con una sujeción externa. Dicha sujeción magnética se acopla al efector final del brazo robótico, de manera que el posicionamiento de la cámara dentro del abdomen se realiza mediante el movimiento del brazo externo. En este trabajo se presenta el diseño y la evolución del mini-robot cámara. La primera versión se evalúa mediante experimentación in-vitro en un entorno quirúrgico. Del análisis de estos experimentos se obtiene un segundo diseño, que ha sido evaluado en un experimento in-vivo con un modelo porcino.

Palabras Clave: Asistente robótico camarógrafo, mini-robot, experimentación in-vivo

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las técnicas de Cirugía Mínimamente Invasiva (CMI) se han convertido en una técnica ampliamente aceptada en hospitales de todo el mundo como alternativa a las técnicas tradicionales de cirugía abierta. En un intento de minimizar el número de incisiones realizadas en el paciente, recientemente ha surgido una nueva técnica dentro de la CMI conocida como cirugía de puerto único o SILS (de su acrónimo en inglés Single Incision Laparoscopic Surgery). La cirugía de puerto único se basa en introducir tanto las herramientas quirúrgicas del cirujano como el endoscopio por una única incisión, a través de un trocar multipuerto [10]. Los beneficios de este nuevo procedimiento, menos invasivo que la CMI multipuerto convencional, incluyen menos dolor, menor tiempo de recuperación, mejoras estéticas y mayor grado de satisfacción de los paciente [9]. Sin embargo, esta técnica presenta una serie de inconvenientes para los cirujanos derivados de la cercanía entre los instrumentos quirúrgicos, entre los que destacan la pérdida de triangulación entre la cámara y las herramientas y la limitación en el rango de movimiento de los instrumentos en el exterior de la cavidad abdominal [2].

Una de las soluciones presentes en la bibliografía para solventar estos inconvenientes es el uso de instrumentos flexibles o curvos especiales, de manera que se pueda abarcar un mayor espacio de trabajo sin colisionar las herramientas. Sin embargo, este tipo de instrumental no solventa el problema de la pérdida de triangulación, y requiere largos periodos de entrenamiento para adquirir destreza en su manejo, incluso para aquellos cirujanos con un alto grado de experiencia en CMI convencional [4]. Los endoscopios flexibles están compuestos de un mango flexible y una punta con capacidad de doblarse, cuyo ángulo de desviación se controla mediante dos ruedas, cada una de las cuales controla un grado de libertad [1]-[6]. El manejo de estos endoscopios requiere la combinación de varias acciones para realizar un determinado movimiento, lo que resulta muy complejo y poco intuitivo para los cirujanos [8].

Una alternativa a estos dispositivos es el desarrollo de robots miniaturizados que se puedan introducir por completo en la cavidad abdominal a través de la incisión que realizan los cirujanos para colocar el trocar. De esta manera, se reduce el número de instrumentos que comparten el puerto de entrada, y se evita la pérdida de grados de libertad debido al efecto fulcro. Además, en el caso de que el mini-robot incorpore una cámara se evita el problema de la pérdida de triangulación, ya que ésta se puede separar de las herramientas para recuperar la sensación de profundidad. El posicionamiento y fijación de estos mini-robots a la cavidad abdominal se puede realizar mediante sutura [5], mediante fijación con agujas [3]-[14], o mediante imanes externos, como en [16] o [22]. El uso de imanes externos permite no solo fijar el dispositivo en una determinada posición, sino también desplazarlo a lo largo de la pared abdominal. En este sentido, Lehman y otros [7] proponen un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mini-robot con dos brazos con capacidad de plegado, que se adhiere a la pared abdominal mediante interacción magnética. En Simi y otros [13], se propone una plataforma de visión inalámbrica basada en un robot actuado magnéticamente. En [15] se propone un concepto similar, donde el dispositivo interno consiste en una estructura triangular actuada magnéticamente sobre la que se colocan un conjunto de unidades robóticas.

Actualmente el grupo de investigación de robótica médica de la Universidad de Málaga está trabajando en un asistente robótico camarógrafo especialmente diseñado para cirugía de puerto único, compuesto por un mini-robot cámara que se introduce en la cavidad abdominal a través de la incisión que realizan los cirujanos y se adhiere a la pared abdominal mediante interacción magnética. La principal diferencia con los mini-robots que se encuentran en la bibliografía radica en el mecanismo de desplazamiento. En nuestro caso, el imán externo se encuentra acoplado al efector final de un brazo robótico, de manera que es éste último el que controla el movimiento de los dispositivos internos, a diferencia de los trabajos anteriores, en los que el imán externo se desplaza manualmente. Disponer de un brazo externo que controle el movimiento del mini-robot permite la implementación de movimientos automáticos que puedan ser comandados por el cirujano mediante un interfaz humano-máquina, o incluso la implementación de movimientos semi-autónomos que permitan al sistema colaborar con el cirujano. En este artículo se presentan el diseño del asistente robótico y la evolución del mini-robot cámara desde su concepción hasta la última versión con la que se ha realizado experimentación in-vivo con un modelo porcino.

De este modo, el artículo presenta la siguiente estructura. En la siguiente sección se presentan los requisitos que debe cumplir un asistente robótico para técnicas de puerto único. La sección 3 presenta el diseño del primer prototipo del mini-robot cámara, junto con un experimento in-vitro para evaluar su viabilidad. En la sección 4 se propone un segundo prototipo del robot, validado mediante un experimento in-vivo en un modelo porcino. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones y los trabajos futuros.

2 REQUISITOS DEL ASISTENTE

Las técnicas de cirugía laparoscópica de puerto único presentan dos importantes inconvenientes para los cirujanos: de un lado, la cercanía de las herramientas y el endoscopio provoca una pérdida de triangulación entre la cámara y las herramientas, lo que se traduce en una pérdida de sensación de profundidad en la imagen adquirida por el endoscopio; del otro lado, el hecho de que tanto las herramientas como el endoscopio se inserten a través de un único trocar provoca una limitación en el rango de movimiento de los instrumentos, lo que dificulta enormemente la labor del cirujano, más teniendo en cuenta que, dado que la mayoría de los procedimientos quirúrgicos requieren el uso de más de una herramienta, debe haber un asistente dedicado al manejo del endoscopio, que debe compartir el espacio con el cirujano. Por lo tanto, un asistente camarógrafo que esté especialmente diseñado para este tipo de técnicas debe resolver estos dos inconvenientes.

Considerando la primera limitación, una solución para aumentar la destreza del cirujano en el manejo de las herramientas es utilizar el trocar únicamente para las dos herramientas que éste maneja, y buscar otro puerto de entrada para el endoscopio. Dado que el fin de las técnicas de puerto único es minimizar el número de incisiones en el paciente, una incisión adicional para el endoscopio no parece ser la mejor solución. Por tanto, el primer requisito de un asistente camarógrafo para este tipo de técnicas es que la cámara que no ocupe un puerto de entrada, es decir, se debe diseñar un dispositivo que se pueda introducir por completo en la cavidad abdominal. Para ello es necesario disponer de una puerta de acceso a la cavidad abdominal. Una posibilidad es aprovechar los orificios naturales del cuerpo humano, como el esófago. Sin embargo, para acceder al abdomen es necesario realizar una incisión en el estómago por la que pueda entrar el dispositivo. Por ello, se considera que la mejor solución es aprovechar la incisión que realiza el cirujano para colocar el trocar por el que introduce las herramientas. Dado que dicha incisión es de unos 4 cm de longitud, el segundo requisito que se le impone al dispositivo que incorpora la cámara es que su sección transversal sea como máximo de 4 cm.

Por otro lado, la segunda limitación hacía referencia a la cercanía entre la cámara y las herramientas, de modo que la solución a este problema pasa por alejar la cámara del puerto de entrada de las herramientas. Por lo tanto, la cámara no solo debe introducirse por completo en el abdomen, sino que además debe tener la posibilidad de desplazarse dentro de él. Con estas consideraciones, se plantean los siguientes requisitos para un asistente camarógrafo destinado a cirugía de puerto único:

1. Inserción completa de la cámara en la cavidad abdominal.
2. Sección transversal máxima de 4 cm.
3. Capacidad de movimiento dentro de la cavidad abdominal, tanto en posición como en orientación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4. Transmisión de imágenes en tiempo real con una resolución de al menos la misma calidad que un endoscopio convencional.
5. Fuente de luz que permita iluminar el área de trabajo.

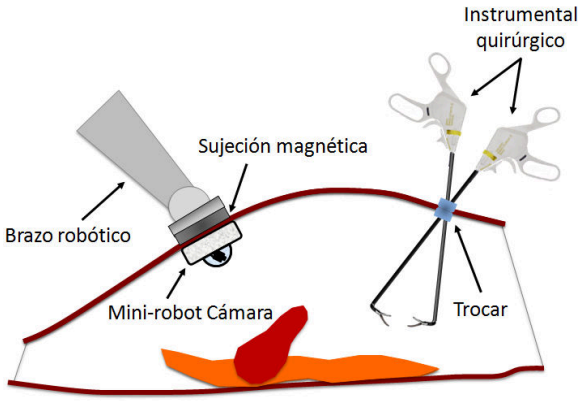


Figura 1: Asistente robótico camarógrafo

Teniendo en cuenta estos requisitos, la figura 1 muestra el esquema de un asistente robótico camarógrafo diseñado específicamente para solventar los principales inconvenientes de las técnicas de cirugía de puerto único. El asistente está compuesto por un mini-robot cámara y un sujeción magnética externa. El mini-robot se introduce en la cavidad abdominal a través de la incisión que realiza el cirujano para introducir las herramientas, antes de que éste coloque el trocar. Incorporando un conjunto de imanes al interior del mini-robot, una vez dentro del abdomen, éste se adhiere a la pared abdominal mediante interacción magnética con la sujeción externa, que no es más que uno o varios imanes permanentes.

El desplazamiento del mini-robot dentro del abdomen se realiza desplazando la sujeción magnética por la superficie del abdomen. Con el objetivo de poder realizar movimientos automáticos de la cámara, y evitar así la necesidad de que haya un asistente especialmente dedicado a su manejo, la sujeción magnética se ha diseñado de manera que se pueda acoplar al efector final de un brazo robótico externo, por lo que el movimiento del dispositivo interno se realiza controlando el movimiento del brazo externo. De esta manera, el cirujano puede controlar el movimiento de la cámara mediante un interfaz hombre-máquina, por ejemplo, mediante comandos de voz. Además de solventar los principales inconvenientes de las técnicas de puerto único, este tipo de asistente permite obtener un mayor número de puntos de vista que un laparoscopio convencional, cuyo movimiento se encuentra limitado por el punto de fulcro.

3 FASE I: PRIMER PROTOTIPO Y EXPERIMENTACIÓN IN-VITRO

El diseño del primer prototipo del mini-robot cámara se muestra en la figura 2. Tal y como se observa en la figura 2.a, las dimensiones del robot son 12 cm de longitud, 4 cm de anchura, y 3 cm de altura. La longitud del robot no supone un problema a la hora de insertarlo en la cavidad abdominal, mientras que su sección viene condicionada por las dimensiones de la incisión por la que se debe insertar, de ahí que se haya ajustado el diseño hasta obtener el máximo valor admisible de 4 cm de sección transversal. La cámara que se ha utilizado es una microcámara de vídeo inalámbrica de alta resolución (más de 380 líneas de Tv), que transmite las imágenes a un receptor exterior [18]. Como sistema de iluminación se dispone de un conjunto de seis LEDs blancos. La cámara se ha protegido con una cúpula semiesférica transparente, que impide que se manche o empañe la óptica de la cámara cuando se inserta en el abdomen del paciente, y además permite que el mini-robot pueda ser esterilizado antes de una intervención sin dañar la cámara.

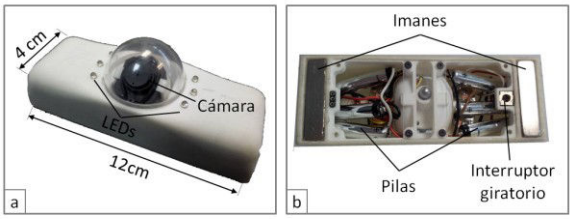


Figura 2. Primer prototipo del mini-robot cámara: (a) parte delantera; (b) parte trasera.

En la figura 2.b se aprecia la parte trasera del mini-robot (se han quitado las cubiertas laterales para poder apreciar el interior del mismo). Dado que uno de los requisitos de diseño es que la cámara no ocupe un puerto de entrada, el dispositivo diseñado ha de ser inalámbrico, de modo que la alimentación de la electrónica que contiene el robot (cámara y conjunto de LEDs) se debe alimentar mediante una batería interna. Por ello, el sistema de alimentación está formado por un conjunto de 6 pilas de 1.5 voltios cada una, dispuestas de tal manera que en su conjunto ocupan el menor espacio posible. El sistema de alimentación proporciona una autonomía al sistema de alrededor de 4 horas, tiempo que, en principio, resulta suficiente para un procedimiento laparoscópico habitual, como una colecistectomía. El sistema de alimentación se enciende mediante un interruptor giratorio, que tiene 3 posiciones: apagado, encendido de la cámara y encendido de la cámara y los LEDs. Para la sujeción del robot a la pared abdominal se han incluido dos imanes permanentes en los laterales, de 40 x 10 x 10 mm [19].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La figura 3 muestra el conjunto del mini-robot, la sujeción magnética, y la muñeca que va acoplada al brazo robótico externo. Como se puede apreciar en la figura, las dimensiones de la sujeción magnética coinciden con las del mini-robot cámara, de manera que los imanes laterales que poseen ambos dispositivos se acoplen dos a dos. El sistema de acoplamiento entre la muñeca y la sujeción magnética se ha diseñado de tal manera que se pueda liberar la sujeción magnética una vez que la cámara se ha colocado en la posición deseada, con el objetivo de dotar al sistema de mayor flexibilidad. Así, en un procedimiento que no requiera un cambio del punto de vista de la cámara durante un periodo prolongado de tiempo, se podría retirar el brazo robótico externo sin que eso afectara a la posición de la cámara. Así mismo, se da la posibilidad tanto de desplazar el robot cámara mediante el brazo externo, como de poder realizarlo de forma manual.

En cuanto al cambio de orientación de la cámara, se ha descartado el uso de un motor interno debido a que requeriría aumentar la batería del sistema y por lo tanto, el tamaño del robot. Por este motivo, se ha optado por el mecanismo de cambio de orientación magnético mostrado en la figura 3, que proporciona dos grados de libertad a la cámara: rotación e inclinación. La rotación se consigue rotando la última articulación del manipulador externo, ya que los imanes internos de la cámara siguen el movimiento de la sujeción magnética. Por otro lado, el movimiento de inclinación está actuado por un motor lineal situado en la muñeca, cuyo movimiento provoca un desplazamiento del componente A. Este componente hueco está a su vez acoplado con el componente B, que tiene un pequeño imán en su parte inferior. Esta pieza está pegada al imán de la sujeción magnética C. Por otro lado, el desplazamiento del imán C provoca el desplazamiento de un imán cilíndrico (D), que se encuentra en el interior del robot cámara y está conectado con la cámara. De esta manera, el movimiento del motor permite variar la inclinación de la cámara en ± 42º.

En cuanto al brazo robótico externo, se ha elegido el manipulador de 7 grados de libertad Barett WAM (Barrett Technology, Inc.) [17]. Este robot está actuado mediante un sistema de cables que presenta baja fricción y baja inercia [12], lo que hace posible mover el efector final a mano hasta la posición deseada. Para realizar el desplazamiento de la sujeción magnética a lo largo de la pared abdominal sin ejercer una fuerza excesiva que pueda dañar al paciente, se ha diseñado un control híbrido de fuerza-posición, descrito en [11], que incluye un módulo de compensación de pares que mantiene el efector final del brazo externo perpendicular a la pared abdominal durante el desplazamiento de la cámara.

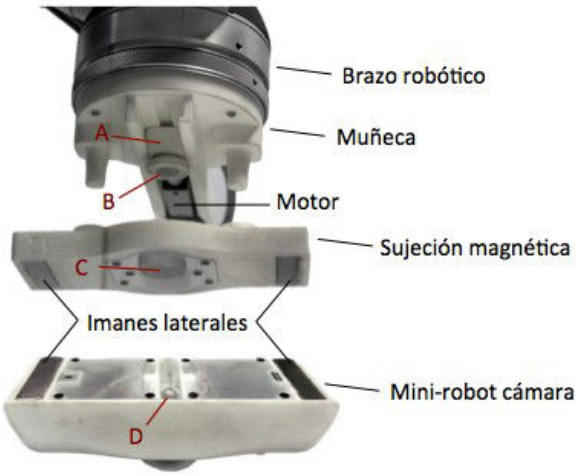


Figura 3. Cambio de orientación de la cámara (marcar los dos grados de libertad con sus flechas)

Para evaluar las ventajas que presenta este asistente robótico camarógrafo se realizaron una serie de experimentos en el laboratorio, en los que se pidió a un grupo de usuarios que realizaran un mismo procedimiento quirúrgico (en concreto, se simuló la extracción de la vesícula biliar en un entorno no real) mediante cirugía de puerto único convencional y utilizando el asistente robótico controlado mediante comandos de voz. El objetivo de los experimentos era comparar la comodidad y destreza de los usuarios en ambos escenarios. Todos los usuarios alegaron sentirse más cómodos utilizando el asistente robótico, puesto que disponían de más espacio para mover las herramientas quirúrgicas. Sin embargo, en dichos experimentos se detectaron una serie de deficiencias en cuanto al diseño del asistente. En primer lugar, pese a que la resolución de la cámara era buena, no fue posible obtener una calidad de la imagen de las mismas características que las ofrecidas por un laparoscopio convencional. Además se detectaron pequeños retardos debido al carácter inalámbrico de la cámara. Por otro lado, las pruebas revelaron la influencia de los imanes laterales, destinados a la fijación del robot a la pared abdominal, en los imanes destinados al giro de la cámara. Es decir, se detectó que durante el desplazamiento del mini-robot se producía un giro indeseado de la cámara.

Además de las pruebas realizadas en el laboratorio, se realizó una demostración en el Centro Médico Jesús Usón de Cáceres frente a un grupo de cirujanas/os especializadas/os, cuyos objetivos principales fueron: probar el funcionamiento del asistente fuera del entorno de trabajo del laboratorio, en un entorno más realista, y conocer la opinión de personal médico especializado. La instalación de la plataforma se llevó a cabo en uno de los quirófanos que el centro médico posee para las prácticas de intervenciones de mínima invasión, tal y como se puede ver en la figura 4. En primer lugar, el personal

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

técnico del laboratorio explicó el funcionamiento del asistente al grupo de cirujanas/os (figura 4.a), y posteriormente se realizó una demostración en la que se varió la posición y orientación de la cámara mediante comandos de voz (figura 4.b). Finalmente, se pidió al personal médico que respondiera una encuesta con objeto de evaluar el grado de satisfacción con el asistente robótico y recoger posibles mejoras que pudiera plantear el personal especializado. Los resultados de dichas encuestas se muestran en la tabla 1, donde las puntuaciones de las afirmaciones planteadas van de 0 (completamente en desacuerdo) hasta 5 (completamente de acuerdo).

Tabla 1: Resultado de las encuestas realizadas en el Centro Jesús Usón

Afirmación	**Evaluación**
El tamaño del mini-robot cámara es apropiado	3.13
La calidad de la imagen es buena	3.22
El asistente permite mostrar más puntos de vista del interior del abdomen	3.65
La autonomía del robot es buena	3.27
El manejo de la cámara mediante comandos de voz es cómodo y sencillo	3.65
El tamaño del brazo robótico es adecuado para su integración en un quirófano	3.39
Los movimientos del brazo robótico no interfieren con la labor del cirujano	3.57
Me gustaría que el asistente realizara ciertos movimientos colaborativos	4.39

Analizando los resultados de la encuesta y las opiniones aportadas por las/os cirujanas/os se concluye que el personal médico considera que el asistente presentado resuelve los principales inconvenientes de las técnicas de cirugía de puerto único, y que el tamaño del mini-robot cámara es aceptable, aunque plantean un cambio en cuanto a su forma: una forma más redondeada facilitaría la inserción del robot a través de la incisión. En cuanto al carácter inalámbrico del dispositivo, las/os cirujanas/os argumentaron que sería deseable, por motivos de seguridad, que el robot dispusiera de algún tipo de mecanismo que permitiera recogerlo en caso de que se perdiera el contacto con la sujeción magnética. Por lo tanto, el hecho de que el robot no fuera inalámbrico, sino que fuera alimentado por un cable desde una fuente de alimentación exterior, resultaría beneficioso puesto que se dispondría de un mecanismo mediante el que recoger el robot en caso de caída. Además en este caso se evitaría el problema de la autonomía de la batería.

Junto con las preguntas relacionadas con el diseño del asistente, se incluyó una pregunta relacionada con la posibilidad de dotar al sistema de cierta inteligencia de manera que pudiera realizar ciertos movimientos colaborativos que pudieran ayudar al cirujano durante la intervención. Tal y como se observa en los resultados de la encuesta, este planteamiento tuvo muy buena aceptación por parte de las/os cirujanas/os, y actualmente constituye una nueva línea de investigación de nuestro grupo. Asimismo, algunos cirujanos plantearon que, como alternativa al uso del asistente como substituto del endoscopio convencional, también resultaría interesante poder utilizarlo como sistema de visión adicional, de manera que se utilizara en conjunto con el endoscopio para proporcionar puntos de vista diferentes de la cavidad abdominal o incluso para tener acceso a zonas a las que el endoscopio no llega. Todas estas consideraciones han dado lugar a un segundo prototipo del mini-robot cámara, que se discute en la siguiente sección.

Figura 4. Demostración en el Centro Médico Jesús Usón

4 FASE II: SEGUNDO PROTOTIPO Y EXPERIMENTACIÓN IN-VIVO

En base a las aportaciones realizadas por el grupo de especialistas, se diseñó la segunda versión del mini-robot cámara, mostrado en la Figura 5. Su tamaño (10 x 3 x 2 cm) es menor al primer prototipo gracias a que se ha eliminado la batería interna. Dado que en este caso no se requería el uso de un cámara inalámbrica, se ha optado por utilizar una webcam comercial de alta resolución, en concreto, el modelo C310 de Logitech, que proporciona una calidad de video HD (1280 x 720 pixels) [20]. Para esta segunda

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

versión se ha utilizado un sistema de iluminación formado por 14 LEDs blancos, ya que en este caso no existen limitaciones en cuanto a la alimentación del sistema. En cuanto al cambio de orientación de la cámara, en este caso se ha optado por realizarlo mediante un micro motor de corriente continua (Pololu Corporation) de dimensiones 2 x 10 x 12 mm, con una reductora de 50:1 [21], de manera que se evita el giro indeseado de la cámara que presentaba el cambio de orientación magnético de la versión anterior.

Como se puede observar en la figura 5.a, se ha rediseñado la forma del mini-robot, con los extremos redondeados en este caso, de manera que se facilite su inserción en el abdomen. Por tanto, para este prototipo se han seleccionado unos imanes con forma cilíndrica, de 20 mm de diámetro y 3 mm de altura [19]. Para facilitar su inserción en el abdomen a través de la incisión realizada en el paciente, se ha diseñado el aplicador mostrado en la figura 5.b. El mini-robot se coloca boca abajo en el aplicador para evitar que durante la inserción, se ensucie la tapa transparente que cubre la cámara debido al contacto con la pared abdominal o con los órganos del paciente.

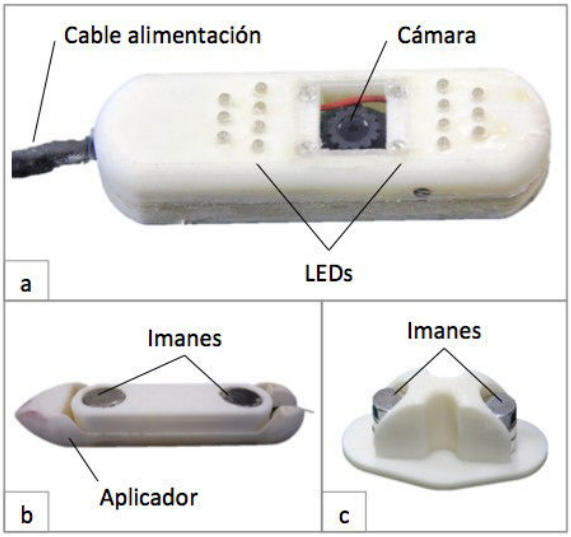


Figura 5. Segundo prototipo del mini-robot cámara: (a) parte delantera; (b) parte trasera con aplicador; (c) sujeción magnética

La evaluación de este segundo prototipo de mini-robot cámara se ha realizado mediante un experimento in-vivo con un modelo porcino en el Centro IACE (Instituto Andaluz de Cirugía Experimental) de Málaga. Los objetivos principales de este experimento fueron, por un lado, comprobar la viabilidad de insertar el robot a través de la incisión que realiza el cirujano para colocar el trocar, y por otro, comprobar la viabilidad del uso de imanes en intervenciones reales, tanto para mantener el mini-robot pegado a la pared abdominal como para desplazarlo sin causar daño al paciente. Dado que a priori no se tenía certeza de que los imanes elegidos proporcionaran la suficiente fuerza como para soportar el peso del mini-robot en un entorno real, se diseñó una sujeción magnética de desplazamiento manual (figura 5.c), que permitiera añadir o quitar imanes en función de las necesidades reales en quirófano. Es por ello que para la evaluación in-vivo del asistente no se utilizó el brazo robótico externo. En experimentos futuros se evaluará también la capacidad del brazo externo para desplazar el mini-robot interno. Los pasos realizados en el experimento in-vivo fueron:

1. Inserción del mini-robot en la cavidad abdominal (figura 6.a).
2. Acople del mini-robot con la sujeción magnética (figura 6.b).
3. Desplazamiento manual de la sujeción magnética para cambiar la posición de la cámara (figura 6.c).

En la figura 6.d se muestra una instantánea del mini-robot dentro de la cavidad abdominal, tomada con un laparoscopio convencional, en la que se puede comprobar que la fuerza ejercida por los imanes externos es suficiente para mantener el robot interno pegado a la pared abdominal. La inserción del mini-robot en el abdomen se realizó a través de la misma incisión que posteriormente utilizó el cirujano para colocar el trocar, por lo que se concluye que el tamaño del dispositivo es apropiado para intervenciones de puerto único. El cable de alimentación se saca fuera de la cavidad abdominal por uno de los lados del trocar. Durante la intervención se comprobó que esto no presenta ningún inconveniente, pues no provoca pérdidas de CO_2 en el abdomen. Sin embargo, se plantea la posibilidad de modificar un trocar comercial para realizar un puerto de salida para el cable de alimentación. En cuanto al desplazamiento de la cámara, se pudo realizar de forma cómoda y sin dañar la pared abdominal del cerdo, tal y como apuntó el cirujano tras examinar la zona por la que se desplazó la cámara.

En cuanto a la proporcionada por la cámara, la figura 7 muestra una instantáneas tomada durante la intervención. Como se puede observar, las imágenes obtenidas no tienen la calidad suficiente como para poder realizar una intervención quirúrgica. Esto se debe a que la cámara elegida no posee la distancia focal requerida para esta tarea, de modo que a la distancia a la que se encuentran los órganos del paciente, la cámara no es capaz de enfocar correctamente, por lo que para versiones futuras del asistente se debe buscar una cámara con una distancia de enfoque de aproximadamente 5 cm y una profundidad de campo de entre 2 y 8 cm. Por otro

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

lado, el cirujano apuntó que el sistema de iluminación le resultada incómodo debido a los reflejos que introducía en la imagen, por lo que como trabajo se futuro se plantea la búsqueda de otro tipo de LEDs más apropiados para este entorno de trabajo.

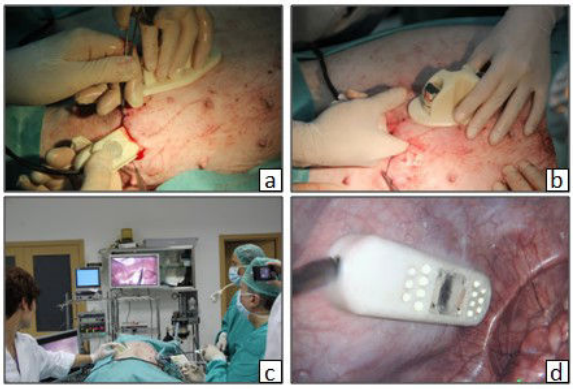


Figura 6. Experimento in-vivo en un modelo porcino: (a) inserción del mini-robot en la cavidad abdominal; (b) acople con la sujeción magnética; (c) desplazamiento de la cámara; (d) instantánea del mini-robot dentro del abdomen

Figura 7. Instantáneas tomadas por el mini-robot cámara durante la intervención.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El asistente robótico camarógrafo propuesto en este trabajo representa una solución al problema de la pérdida de triangulación debido a la proximidad de la cámara y las herramientas quirúrgicas durante procedimientos de puerto único. El primer prototipo del mini-robot cámara se diseñó de tal manera que fuera un dispositivo inalámbrico, que se pudiera introducir en la cavidad abdominal sin ocupar ningún puerto de entrada. Este prototipo se evaluó en una serie de experimentos in-vitro, realizados tanto en el laboratorio como en uno de los quirófanos del Centro Médico Jesús Usón de Cáceres. Las conclusiones obtenidas de estos experimentos, y las aportaciones realizadas por un conjunto de especialistas, dieron lugar a una segunda versión del mini-robot. Este segundo prototipo se modificó de manera que se pudiera alimentar desde el exterior, perdiendo el carácter inalámbrico anterior. La evaluación de este dispositivo se realizó en un experimento in-vivo con un modelo porcino en el Instituto Andaluz de Cirugía Experimental de Málaga.

Este segundo experimento demostró la viabilidad del asistente desarrollado, tanto en cuanto a su tamaño como a la capacidad de los imanes para posicionar la cámara dentro de la cavidad abdominal. Sin embargo, se detectaron una serie de deficiencias que deben ser corregidas en una versión futura. De un lado, se debe buscar una cámara que proporcione, no solo la calidad requerida para su uso en intervenciones quirúrgicas, sino también la distancia focal apropiada para que enfoque de forma correcta en el interior del abdomen. Asimismo, se debe modificar el sistema de iluminación de manera que se elimine el reflejo que introduce el sistema actual. Además, se debe considerar el diseño de un mecanismo que permita recoger el robot en caso de caída. Por lo tanto, el siguiente paso que se plantea es realizar un nuevo diseño que cumpla con estas especificaciones. Posteriormente, se procederá a evaluar la capacidad del brazo robótico externo para desplazar la cámara en el interior del abdomen en una intervención real.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del Proyecto Nacional DPI2010-21126-C03-01. Asimismo, se agradece al Dr. Eduardo Sánchez de Badajoz Chamorro (Departamento de cirugía, obstetricia y ginecología de la Universidad de Málaga) su colaboración y ayuda en el experimento in-vivo realizado en la Instituto Andaluz de Cirugía Experimental de Málaga.

Referencias

[1] Binenbaum SJ, Teixeira JA, Forrester GJ, Harvey EJ, Afthinos J, Kim GJ, Koshy N, McGinty J, Belsley SJ, Todd GJ., (2009) Single-incision laparoscopic cholecystectomy using a flexible endoscope, Arch Surg., pp.734 - 738.

[2] Bucher P., Pugin F., Morel P., (2010) Single port access lapaoscopic right hemiclectomy, International Journal Colorectal Dis., vol. 23, pp. 1013-1016.

[3] Castro C.A., Smith S., Alqassis A., Ketterl T., Sun Y., Ross S., Rosemurgy A., Savage P.P., Gitlin R.D., (2012) MARVEL: a wireless miniature anchored robotic videoscope for expedited laparoscopy, 2012 IEEE Internatinal Conference on Robotics and Automation RiverCentre, pp. 2926-2931.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[4] Cox D.R., Zeng W., Frisella M.M., Brunt L.M., (2011) Analysis of standard multiport verus single-site access for laparoscopic skills training. Surg Endosc, vol. 25, pp. 1238-1244.
[5] Hu T., Allen P.K., Hogle N.J., Fowler D.L., (2008) Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom and lighting, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2948-2953.
[6] Karimyan V., Sodergren V., Clark J., Yang G.Z., Darzi A., (2009) Navigation systems and platforms in natural orifice translumenal endoscopic surgery (NOTES), International Journal of Surgery, Vol. 7, No. 4, pp. 297-304.
[7] Lehman A.C., Dumpert J., Wood N.A., Redden L., Visty A.Q., Farritor S., Varnell B., Oleynikov D., (2009) Natural orifice cholecystectomy using a miniature robot, Surgical Endoscopy Journal, Vol. 23, pp. 260-266.
[8] Ott L., Zanne Ph., Nageotte Fl., de Mathelin M., Gangloff J., (2008) Physiological motion rejection in flexible endoscopy using visual servoing, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008, pp. 2928-2933.
[9] Philipp S.R., Miedema B.W., Thaler K., (2009) Single-incision laparoscopic cholecystectomy using conventional instruments: early experience in comparison with the gold standard, Journal of the American College of Surgeons, Vol. 209, No. 5, pp. 632-637.
[10] Rao P. P, Rao P. P., Bhagwat S., (2011) Single-Incision Laparoscopic Surgery- current status and controversies. Journal of minimal access surgery, vol. 7(1), pp. 6-16.
[11] Rivas-Blanco I., Bauzano E., Cuevas-Rodriguez M., del Saz-Orozco P., Muñoz V. F. (2013) Force-position control for a miniature camera robotic system for single-site surgery, 2013 IEEE/SRJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3065-3070.
[12] Rooks B., (2006) The harmonious robot, Industrial Robot: An International Journal, vol. 33, no. 2, pp. 125–130.
[13] Simi M., Silvestri M., Cavallotti C., Vatteroni M., Valdastri P., Menciassi A., Dario P., (2013) Magnetically Activated Stereoscopic Vision System for Laparoscopic Single-Site Surgery, in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No.3, pp. 1140-1151.
[14] Sun Y., Anderson A., Castro C., Lin B., Gitlin R., Ross S., Rosemurgy A., (2011) Virtually transparent epidermal imagery for laparo-endoscopic single-site surgery, 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 2107-2110.
[15] Tognarelli S., Salerno M., Tortora G., Quaglia C., Dario P., Menciassi A., (2012) An endoluminal robotic platform for minimally invasive surgery, fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 7-12.
[16] Valdastri P, Quaglia C, Buselli E, Arezzo A, Di Lorenzo N, Morino M, Menciassi A, Dario P, (2010) A magnetic internal mechanism for precise orientation of the camera in wireless endoluminal applications, Endoscopy, vol. 42(6), pp. 481-486.
[17] http://www.barrett.com/robot/products-arm.htm
[18] http://www.superinventos.com/s130347.htm
[19] http://www.supermagnete.es/
[20] http://www.logitech.com/en-us/product/hd-webcam-c310
[21] http://www.pololu.com/product/1098/
[22] Zeltser I. S., Bergs R., Fernandez R., Baker L., Eberhart R., Cadeddu J. A., (2007) Single trocar laparoscopic nephrectomy using magnetic anchoring and guidance system in the porcine model, J. Urol., vol. 178, pp. 288–291

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

IMPLEMENTACIÓN DE UNA LIBRERÍA EN SIMULINK PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR

Alberto León, Enrique Hortal, Alberto Rodríguez, José M. Climent, José M. Cano, José M. Azorín.
Universidad Miguel Hernández de Elche
Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante)
ehortal@umh.es

Resumen

Este artículo describe la implementación de un sistema BCI (Brain-Computer Interface) en un entorno de Simulink. Estos sistemas cerebro computador nos permiten interactuar con el ordenador sin necesidad de movimiento corporal, ya que esta interactuacción se realiza a través de la decodificación de las señales cerebrales que son registradas sobre el cuero cabelludo del usuario. El objetivo de este artículo es explicar la metodología que se ha seguido para la adaptación del sistema al entorno Simulink. Este sistema permitirá tener una mayor modularidad, con el propósito de poder generar pruebas independientes con mayor rapidez y además poder detectar y corregir los fallos con mayor eficacia gracias a la nueva arquitectura compartimentada.

Palabras clave: Interfaz cerebro-computador, librería Simulink, sistema modular.

1 INTRODUCCIÓN

La actividad cerebral, según la manera de adquirir las señales bioeléctricas producidas en el cerebro, puede ser registrada de diferentes formas: invasiva y no invasiva. Las técnicas invasivas miden la actividad de una neurona o de uno grupo de estas [1], [6]. Esta actividad puede ser registrada usando microelectrodos intracraneales implantados directamente en el cerebro. En el ámbito humano estos sistemas han sido utilizados, por ejemplo, para el desarrollo de aplicaciones de escritura en un PC (Personal Computer), para el movimiento del cursor o para controlar una prótesis robótica [8].

Por otro lado, las técnicas no invasivas, se basan en el registro de señales elecroencefalográficas (EEG) mediante electrodos situados sobre el cuero cabelludo de los pacientes [5]. Esta última técnica es la que se utiliza en este artículo debido a los posibles riesgos médicos que derivan de la cirugía, además de los componentes éticos que plantea el procedimiento invasivo. Con una técnica no invasiva nos aseguramos no producir ningún tipo de daño en el tejido cerebral.

Podemos distinguir dos paradigmas de control, uno evocado y el otro espontáneo. Los paradigmas relacionados con eventos evocados se basan en la correspondencia de un patrón de señal característico generado de forma automática en respuesta a un estímulo externo [9] como por ejemplo el P300.

En cuanto a los potenciales espontáneos, las señales electroquímicas son recogidas en el cuero cabelludo y provienen del cortex. Estas señales cambian cuando se realiza una tarea mental relacionada con una tarea física o cognitiva de modo que esta acción es ejecutada de forma voluntaria. El uso de este paradigma puede aplicarse tanto a movimientos unidimensionales [10] de un cursor como al control de un brazo robótico mediante diversos estados mentales [3].

En este artículo se lleva a cabo la creación de una librería de Simulink que permita configurar la arquitectura de un sistema BCI. Dicha arquitectura se ha dividido en bloques con diferentes funcionalidades como adquisición, registro, procesamiento de datos, extracción de características, clasificación y el bloque de la interfaz gráfica para el registro online. La utilización de esta nueva arquitectura nos proporcionará una mayor modularidad que conlleva una mayor facilidad para la realización de las pruebas y la depuración del sistema.

2 LIBRERÍA SIMULINK

En este apartado se describen los bloques de Simulink creados para diseñar la arquitectura de un sistema basado en una interfaz no invasiva [5], que recoge las señales EEG sobre el cuero cabelludo del usuario. Estas señales son procesadas y analizadas por el software del ordenador donde simultáneamente se mostrará un feedback visual para ayudar al usuario a controlar sus pensamientos y de esta forma proporcionará un mayor control de la interfaz gráfica que utilizaremos para realizar la prueba.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

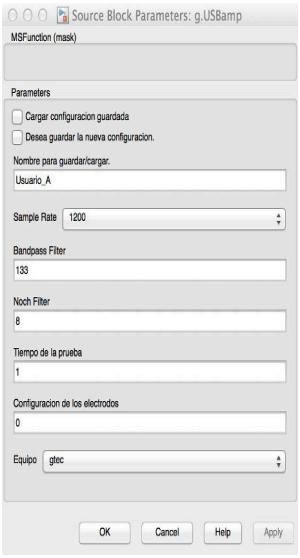


Figura 1: Ejemplo de los campos configurables del bloque de adquisición.

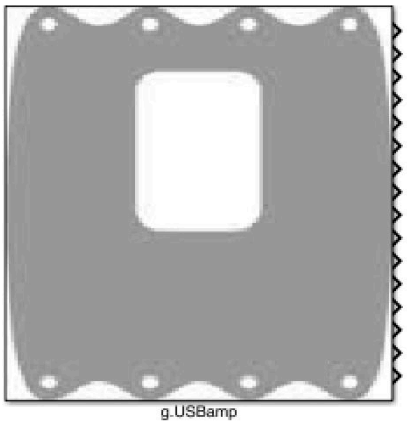


Figura 2: Muestra del bloque de adquisición.

2.1 SOFTWARE

Las señales EEG son registradas y procesadas utilizando un software desarrollado en Matlab (software matemático desarrollado por Mathworks). Para utilizar este software se hará uso de la API (Application Programing Interface) de Matlab distribuida con el dispositivo (g.USBamp Matlab API). Mediante el uso de esta aplicación y el lenguaje de programación Matlab, se ha creado una librería de bloques en Simulink con el que se realiza el desarrollo del sistema.

2.2 BLOQUES SIMULINK

Los bloques en los cuales se han compartimentado las etapas del registro, procesado y feedback de la prueba son los siguientes: adquisición, registro, procesado, extracción de características, clasificación e interfaz gráfica online.

2.2.1 BLOQUE DE ADQUISICIÓN

Este bloque ha sido diseñado para aportar la mayor capacidad de configuración posible, además permite tanto guardar la configuración que se está utilizando como cargar una configuración que se haya utilizado previamente.

Este bloque permite configurar diferentes campos con la intención de hacerlo lo más versátil posible. Se puede observar un ejemplo extraído del bloque de adquisición en la figura 1.

A continuación se describen algunos de estas opciones de configuración.

En primer lugar, se debe escribir el nombre con el que se desea guardar la configuración. Después se muestran opciones de configuración técnicas como son la frecuencia de muestreo, el filtro paso-banda que queremos utilizar, el filtro notch y el tiempo de duración de la prueba.

Además, está también disponible para su configuración el equipo que se utiliza, por si se quisiera cambiar de equipo o la configuración de éste. Así como la configuración de los electrodos, que también es variable según la distribución de los mismos.

Este bloque se encarga de conectar el g.USBamp y realizar la configuración con todos los parámetros que se han establecido.

La salida de este bloque siempre va a ser 16 canales, correspondientes a los 16 electrodos y en fracciones de segundo lo suficientemente pequeñas para que no afecte al procesamiento en tiempo real y para que no se pierda información de la señal que se está adquiriendo.

Se observa una muestra del bloque en la figura 2.

2.2.2 BLOQUE DE REGISTRO

En este bloque se lleva a cabo el registro de todos los datos de la prueba. En éste se encuentran las opciones de configuración disponible de este bloque los cuales son el nombre de usuario y el tipo de prueba. El nombre del usuario se utilizará como nombre para ficheros en los que los datos quedarán almacenados.

Por otro lado, existe un campo que permite especificar el tipo de prueba que se desea realizar (*online* u *offline*). Si el tipo de prueba que se selecciona es la prueba offline, éste será el bloque que se encargará de guardar un registro de los datos que se han adquirido de los usuarios. En este tipo de pruebas, este bloque se encarga de manejar toda

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 3: Bloque de registro en su configuración *online*.

la interfaz gráfica. Los tipos de interfaz gáfica se explicarán más adelante.

Si por el contrario, el tipo de prueba que se realiza es la prueba online, este bloque de Simulink sólo se encargará de guardar un registro de seguridad, inicializar la interfaz gráfica y pasar los datos al siguiente bloque.

Respecto a la interconectividad entre bloques, este bloque tiene como entradas los 16 canales correspondientes a cada uno de los electrodos que se utilizan en la prueba. Para la prueba online, aparecen 16 conexiones en la parte derecha del bloque, estas son las necesarias para realizar la conexión con el bloque siguiente. No obstante, estas conexiones se suprimen cuando se selecciona el tipo de prueba offline. Este bloque, en su configuración offline, no dispone de salida de datos. Se puede observar el bloque en su configuración *online* en la figura 3.

2.2.3 BLOQUE DE PROCESAMIENTO

Este bloque será el encargado de procesar todos los datos que se obtienen del registro de señales del usuario. Las opciones de configuración en este bloque son las siguientes: *frequency range, filter type, laplacian surface grid scale, normalization variance, overlap* y *samples*. Estos seis campos de configuración permitirán adaptar el procesado de los datos para obtener el resultado deseado en la prueba online.

El campo *frequency range* es en el campo en el cual se especifica el rango de frecuencias de la señal que se desea procesar. En el campo *laplacian surface grid scale* se indica la configuración del filtro laplaciano que se aplicará sobre las señales EEG. Este filtro realiza un suavizado de la señal, mejorando su calidad ya que se elimina en gran medida la distorsión de señal generada por los electrodos cercanos. En el apartado de *normalization variance* se indica que tipo de varianza se desea aplicar.

Por lo que respecta a los parámetros de *overlap* y *samples*, éstos están relacionados con la cantidad de muestras que se van a procesar en cada trial y con la cantidad de muestras que se utilizan de forma reiterativa respecto de las utilizadas anteriormente (solapamiento).

Con lo cual, en el apartado de *samples* se especificará cuantas muestras serán procesadas de forma conjunta. En el apartado de *overlap* se especifica cuantas muestras del bloque anterior se utilizan en el nuevo bloque de muestras a procesar.

En cuanto a los puertos de conectividad de este bloque, podemos encontrar 16 canales de entrada y de salida.

2.2.4 BLOQUE DE EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Este bloque se encarga de extraer las características de la señal. Estas características serán las utilizadas posteriormente para la clasificación de las señales de los diferentes estados mentales que se utilicen en las pruebas.

Para llevar a cabo este proceso es necesario especificar ciertos parámetros de configuración como son el tipo de resolución, el tipo de extracción de las características (como podrían ser Wavelet, FFT, periodograma, etc) y los rangos de frecuencias de los cuales se realizará la extracción de las características.

2.2.5 BLOQUE CLASIFICADOR

Este bloque es el que se encarga de clasificar en qué estado mental se encuentra el usuario que realiza el experimento. Esto se lleva a cabo mediante un método de comparación con un modelo que previamente se ha cargado en el sistema.

El modelo necesario para la clasificación de las señales se genera con anterioridad después de realizar una prueba offline en la cual se obtenienen los datos del cortex motor del usuario mientras realiza las tareas mentales requeridas.

El único campo a configurar que contiene este bloque, es el modelo que debe cargar el sistema, el cual se va a utilizar para la clasificación de señales en la prueba online.

Por lo que respecta a la conectividad, este bloque cuenta con una entrada (el vector de características de la señal) y una salida (la tarea mental clasificada).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

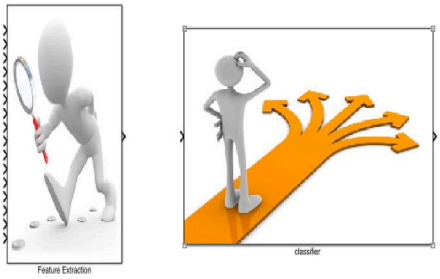


Figura 4: Bloques de extracción de características y de clasificación.

2.2.6 BLOQUE DE INTERFAZ GRÁFICA

Este bloque es el encargado de manejar el feedback que recibe el usuario en las pruebas online. Cabe destacar que no existe ningún parámetro que permita configurar nada para poder modificar esta interfaz, ya que cada interfaz gráfica que se utiliza es exclusiva de la prueba que se lleva a cabo. La entrada de este bloque será utilizada para controlar la interfaz gráfica que hace de realimentación (o feedback).

3 EJEMPLO DE APLICACIÓN

En esta sección se describe la metodología diseñada para la realización de experimentos de clasificación de tareas mentales en un sistema BCI espontáneo. La metodología incluye la selección de las tareas mentales, los protocolos de adquisición de las señales y el método de clasificación SVM.

En la figura 5 se muestra el esquema de conexión para las pruebas *offline* y *online* utilizando los bloques descritos en la sección 2.2.

3.1 INTERFAZ GRÁFICA

Por lo que respecta al protocolo que se ha utilizado para realizar la interfaz gráfica, se distinguirá entre la prueba *online* y la *offline*.

La interfaz gráfica de la prueba *offline* consta de tres partes. En la primera etapa se muestra una cruz que sirve para indicar al usuario el inicio de cada ciclo del programa, además de servir de periodo de relajación. Esta primera fase dura tres segundos. En la segunda etapa mostramos una imagen de la tarea mental en la cual el usuario debe concentrarse para posteriormente registrar su actividad neuronal, esta etapa dura dos segundos. Y por último, se entra en la fase en la cual son registrados los datos. Cabe destacar que en esta última fase no se muestra nada en la pantalla, con

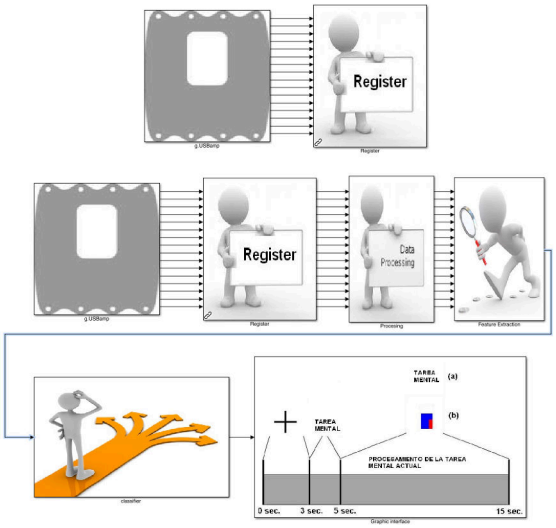


Figura 5: Esquemas de conexión para pruebas offline (arriba) y online (abajo).

el motivo de intentar evitar las posibles distracciones del usuario. Esta última etapa dura diez segundos. Como se ha comentado anteriormente, en el caso de pruebas offline, el bloque de registro es el encargado de controlar dicha interfaz.

En cuanto a la interfaz *online*, también existen tres etapas dentro de la prueba. Las dos primeras etapas son exactamente iguales en tiempo y en contenido que en la prueba *offline*. Sin embargo, en la tercera etapa no se mantiene la pantalla vacía si no que se muestra la tarea mental en la cual el usuario debe concentrarse. Al mismo tiempo, un rectángulo de color azul en la parte derecha de la pantalla se va completando conforme se detecta que el usuario está realizando la misma tarea mental en la que se encuentra el algoritmo en ese instante, a modo de feedback. En el caso de que la tarea detectada sea incorrecta, una barra de colo rojo actúa como feedback negativo, del mismo modo que con la barra azul. Además esta etapa también tiene una duración de diez segundos.

El paradigma gráfico utilizado para realizar las pruebas *online* se observa en la figura 6.

3.2 REGISTRO

La interfaz neuronal implementada para esta tarea esta compuesta de un sistema espontáneo no invasivo. El hardware con el que se ha realizado la adquisición de las señales bioeléctricas (EEG) está compuesto por un amplificador g.USBamp (g.tec medical engineering, Austria). Este amplificador tiene 16 canales y una configuración variable para diferentes tipos de filtros y frecuencias de muestreo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

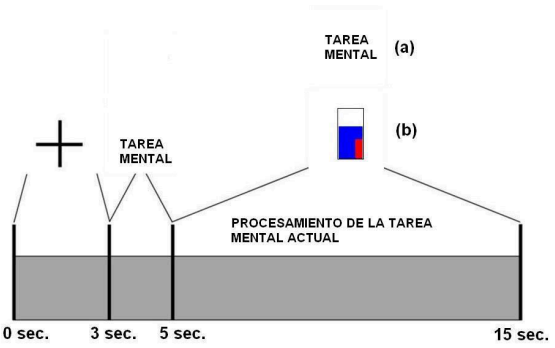


Figura 6: Paradigma de la interfaz gráfica *online*.

Un gorro g.GAMMAcap (g.tec medical engineering, Austria) es utilizado para sujetar todos los electrodos, facilitando su correcta colocación. Los sensores utilizados son los g.LADYbird, de la misma compañía. Estos electrodos son activos permitiendo mejorar la relación señal-ruido. Además, estos sensores se ven menos afectados por los artefactos y por las interferencias electromagnéticas [4] que los electrodos pasivos, mejorando la relación señal/ruido.

Serán utilizados 16 electrodos, un electrodo por cada canal, distribuidos de forma uniforme a través de todo el cuero cabelludo para abarcar una mayor parte de la zona motora del cerebro.

En este caso el periodo de muestreo utilizado es de 256 Hz, además se han configurado y aplicado dos filtros internos a cada uno de los canales. Uno de ellos es un filtro notch a 50 Hz. Este filtro se utiliza para eliminar el ruido procedente de la red eléctrica. Además, se aplica un filtro paso banda de 0,5 a 100 Hz utilizado para reducir los artefactos y la componente de la corriente continua.

La distribución de los electrodos es la siguiente: Fz, FC5, FC1, FCz, FC2, FC6, C3, Cz, C4, CP5, CP1, CP2, CP6, P3, Pz y P4 de acuerdo con el sistema 10/10 internacional (ver figura 7). Como tierra se utiliza el eletrodo colocado en la posición AFz (según el sistema 10/10) y como referencia de tensión se utiliza el lóbulo de la oreja.

3.3 PROCESADO DE LA SEÑAL

Las señales son procesadas para tranformar las señales en el dominio del tiempo, a características en el dominio frecuencial para poder ser tratadas fácilmente por un clasificador SVM. En primer lugar se aplica un filtro paso banda de 5 a 40 Hz para obtener la banda que nos proporciona mayor información acerca de la actividad mental a clasificar. Después, un filtro laplaciano es aplicado sobre los 16 canales. Este método permite incrementar la calidad de la señal. Por último se estima la densidad espectral de la señal utilizando el método del periodograma.

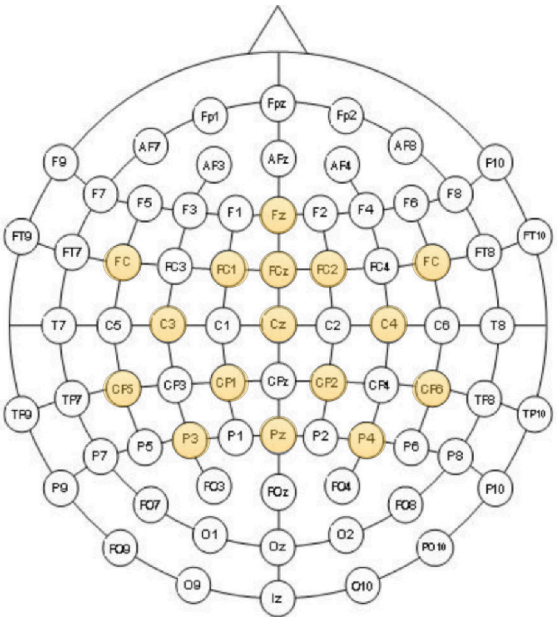


Figura 7: Distribución de los electrodos según el sistema 10/10 internacional.

El periodograma es un método de cálculo espectral que utiliza una estimación de la potencial espectral o PSD, de sus siglas en inglés (Power Spectral Density), la cual usa una transformada discreta de Fourier (DFT). Este método se aplica a la señal en tramos de señal de 1 segundo, aplicándolo cada 500 ms (con lo que se produce un solape de 500 ms entre iteraciones). Las características que se utilizarán para la posterior clasificación están en las frecuencias de 8 a 36 Hz con 1 Hz de resolución. Como consecuencia de este tipo de procesado se extraen 29 características por electrodo, haciendo un total de 464 para cada trial.

3.4 CLASIFICACIÓN

Este clasificador se basa en el método SVM. Éste es un método muy extendido a la hora de realizar la clasificación de datos en sistemas BCI. Para realizar la clasificación, SVM crea uno o varios hiperplanos en una o varias dimensiones espaciales, con la intención de distinguir entre varias clases. La calidad de este método depende del kernel y de los parámetros utilizados. En el caso de los sistemas BCI se utiliza generalmente un kernel Gausiano o Radial (RBF), de sus siglas en inglés Radial Basis Function [2]. En el caso descrito aquí, el sistema está basado en un RBF. Este tipo de kernel tiene dos parámetros importantes: γ (el cual regula el tamaño del kernel) y C (es el parámetro de regulación). Los valores de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

estos parámetros se establecen teniendo en cuenta los estudios realizados anteriormente [2], con estos parámetros y con una configuración similar. Se toman como valores C=512 y γ =0, 002.

Las 8 primeras pruebas que realiza el usuario son las utilizadas para generar el modelo basado en la clasificación SVM, este modelo es el que se utilizará para comparar los resultados con la prueba online. Cada prueba de 2 tareas mentales contiene 184 trials de datos por cada tarea mental. Con lo cual, resultan 1472 trials de datos por cada tarea mental para crear el modelo. Usando este modelo el sistema clasifica la tarea mental que está realizando el usuario en ese momento. Para evitar (o al menos reducir) el número de errores en la clasificación, la salida del classificador no se utiliza directamente como salida del sistema. Con este propósito se utiliza una moda en la que, tanto la clasificación actual como las 4 anteriores son tenidas en cuenta. Sólo si se obtiene un mínimo de 4 clasificaciones de la misma tarea el sistema reconoce el estado mental del usuario como tal. En cualquier otro caso, el dato es considerado como incierto.

4 CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo ha sido el desarrollo de una librería de bloques para entorno Simulink que permita el diseño de un sistema BCI (Brain-Computer Interface). Este sistema incluye la adquisición, procesado y clasificación de señales EEG. Utilizando bloques Simulink, se permite un manejo del sistema más fácil y rápido y la utilización y futuros desarrollos de aplicaciones, así como una depuración más sencilla. Posteriormente se podrán generar bloques independientes los cuales nos ofrecen la capacidad de generar diferentes tipos de pruebas, tanto *online* como *offline*. La creación de este nuevo sistema está orientada a su posterior aplicación en pruebas con sistemas BCI permitiendo una sencilla ampliación del sistema con nuevos bloques e interfaces independientes.

Además, se incluye un ejemplo de configuración de los bloques diseñados para la realización de experimentos basados en BMI espontáneo para la diferenciación de dos tareas mentales y su clasificación en tiempo real. En el futuro, esta librería será utilizada para desarrollar este tipo de pruebas. Por otro lado, esta librería irá siendo actualizada con nuevos bloques que permitan una mayor versatilidad y permitirá la aplicación de dicha librería con diferentes interfaces.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España como parte del proyecto Brain2motion - Development of a Multimodal Brain-Neural interfaz to Control an Exoskeletal: Neuroprosthesis Hybrid Robotic System for the Upper Limb (DPI2011-27022-C02-01), y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport of Generalitat Valenciana de España a través de la subvención VALi+d ACIF/2012/135.

Referencias

[1] Carmena, J. M., Lebedev, M. A., Crist, E. E., O'Doherty, J. E., Santucci, D. M., et al (2003) Learning to Control a BrainMachine interface for Reaching and Grasping by Primates, PLOS Biology, vol.1, no. 2.

[2] Flórez, F., Azorín, J. M., Iáñez, E., Ubeda, A., Fernández., E., (2011) Development of a low-cost SVM-based spontaneous Brain-Computer interface, International Conference on Neural Computation Theory and Applications, pp. 415-421.

[3] Iáñez, E., Azorín, J. M., Úbeda, A., Ferrández, J. M. and Fernández, E., (2010) Mental tasks-based brain-robot interface. Robotics and Autonomous Systems. 58(12) , pp 1238- 1245.

[4] Iáñez, E., Azorín, J. M., Ubeda, A., et al (2010), Mental tasks-based brain-robot interface, Robotics and Autonomous Systems 58 (12), pp 1238-1245

[5] Millán, J. de R., Ferrez, P. W., Buttfield, A. (2005) Non Invasive Brain-Machine interface. Final Report. IDIAP Research Institute-ESA.

[6] Nicolelis, M. A. L., (2001) Actions from thougths, Nature, vol. 409, pp 403-407.

[7] Tong, S., (2009) Quantitative EEG analysis methods and clinical applications, Norwood, MA, USA, Artech House, pp. 51-108.

[8] Velliste, M., Perel, S., Spalding, M.C., Whitford, A.S. and Schwartz, A.B., (2008) *Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding.* Nature, 453(7198), 1098-1101.

[9] Wang, Y., Gao, X., Hong, B., Jia, C. and Gao, S., (2008) *Brain- computer interface based on visual evoked potentials. IEEE Engineering in medicine and biology magazine, 27*, pp 64-71.

[10] Wolpaw J. R., McFarland D. J. Neat G. W. and Porneris C.A. (2008) An EEG-based

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

brain-computer interface for cursor control. Electroencephalographic Clinical Neurophysiology, 78(3), pp 252-259.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE MERCANCÍAS EN LOGÍSTICA MEDIANTE MÚLTIPLES CÁMARAS DE RANGO

Pablo Artaso y Gonzalo López-Nicolás
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón - Universidad de Zaragoza, España
artaso_pablo@hotmail.com, gonlopez@unizar.es

Resumen

En este artículo se presenta un sistema para la estimación del volumen de la mercancía transportada por una transpaleta. Para ello, se ha utilizado la información proporcionada por un conjunto de sensores de rango basados en distintas tecnologías como son la de luz estructurada y la de tiempo de vuelo. Se ha realizado un estudio de la precisión y exactitud de cada una de las cámaras para poder compararlas y conocer mejor su funcionamiento ante las variaciones de las condiciones de trabajo. Así mismo, se ha estudiado su comportamiento al trabajar conjuntamente con otros sensores de rango. La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de los algoritmos que permiten estimar el volumen de la mercancía a partir de la información proporcionada por los diferentes dispositivos trabajando simultáneamente. La propuesta ha sido validada experimentalmente en un conjunto de situaciones reales, lo que ha permitido comprobar la validez del sistema diseñado.

Palabras clave: Sensores de rango, luz estructurada, tiempo de vuelo, RGB-D, volumen.

1 INTRODUCCIÓN

Una de las áreas más importantes de cualquier tipo de empresa, independientemente del sector en el que desarrolle su actividad, es la logística. Este campo ha cobrado especial importancia en las últimas décadas con el proceso de globalización experimentado. Por este motivo, se busca el ahorro de costes y de tiempo en cada uno de los procesos logísticos. Una consecuencia de esto es la progresiva incorporación de la tecnología.

En los últimos años han sido desarrollados sensores de rango de bajo coste que permiten su amplia utilización en el campo de la investigación entre otros, y cuya consecuencia ha sido el desarrollo de nuevas técnicas para el procesamiento de nubes de puntos. Algunos ejemplos de este tipo de dispositivos son los sensores RGB-D como la Asus Xtion Pro Live. Sin embargo, el uso de esta clase de sensores no está aún ampliamente extendido en el campo de la industria por las carencias en cuanto a robustez y protección que presentan, al estar concebidos como controladores para juegos. Hay otro tipo de dispositivos que están siendo introducidos paulatinamente en algunos procesos industriales cuya finalidad es la misma, la de obtener información de rango, pero que lo hacen de una manera muy diferente. Algunos ejemplos de este segundo grupo son las cámaras Mesa SR 4000 e IFM PDM 3D sensor.

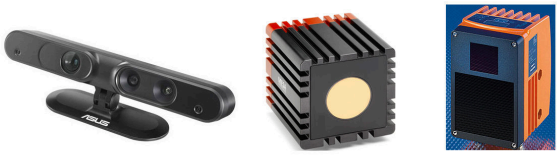


Figura 1: Imágenes de los dispositivos utilizados.

En este contexto, este artículo presenta un sistema que mediante la utilización simultánea de varios dispositivos de los ya mencionados, es capaz de calcular el volumen de la mercancía colocada encima de un palé que está siendo transportado por una transpaleta. Éste es un método de transporte ampliamente utilizado tanto para la carga y descarga de camiones o furgonetas como para transportar mercancía, por lo que la aplicación del método desarrollado puede suponer un ahorro de costes y de tiempo y un mejor control logístico. En la actualidad, existen algunos sistemas para calcular el volumen como los presentados en [6] o en [11]. Otro algoritmo que también permite calcular el volumen y que también ha sido evaluado, aunque obteniendo resultados poco satisfactorios, es [3]. Sin embargo, hasta ahora no se han desarrollado sistemas similares al diseñado en este trabajo capaces de estimar volúmenes de carga a partir de diferentes tipos de sensores de rango trabajando simultáneamente. Los dispositivos con los que se ha trabajado son una Asus Xtion Pro, una Asus Xtion Pro Live, dos Mesa SR 4000 y dos IFM PMD 3D (fig. 1). Los dos primeros dispositivos están basados en luz estructurada. Los dos últimos tipos de sensores se basan en la tecnología de tiempo de vuelo [10]. Al tratarse de sensores que obtienen la información a partir de tecnologías

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

diferentes, los datos disponibles para trabajar son muy distintos.

Sin pérdida de generalidad, se ha considerado que la carga cuyo volumen se quiere estimar está formada por cajas de cartón de diferentes tamaños, ya que es el modo habitual de almacenamiento. También se ha supuesto por motivos de seguridad y por las limitaciones de los sensores que no existen huecos internos entre las mercancías ni elementos en voladizo. En la figura 2 se muestra una imagen tomada durante una prueba del sistema. En ella se puede observar la colocación de los dispositivos en el entorno de trabajo y, en la pantalla situada lateralmente, la interfaz de usuario desarrollada mostrando los resultados así como lo que registra cada dispositivo en tiempo real.

Un aspecto importante es la integración de toda la información proporcionada por los distintos tipos de dispositivos. Para ello se ha trabajado con el concepto de nube de puntos, ya que ofrece una gran versatilidad para trabajar con datos en 3D. La herramienta escogida para trabajar con las nubes de puntos es la librería de uso libre "Point Cloud Library" (PCL)[12]. También se ha utilizado la librería de uso libre OpenCV para el procesamiento de imágenes 2D.

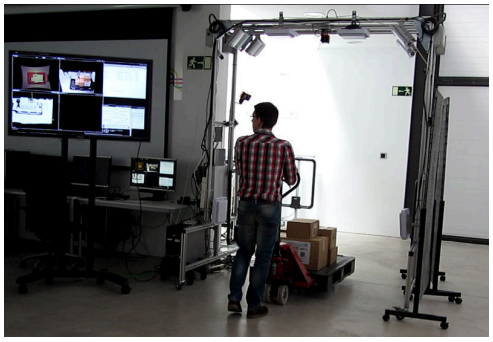


Figura 2: Entorno en el que se han realizado las pruebas del sistema desarrollado.

2 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Al trabajar con diferentes tipos de sensores, uno de los aspectos claves ha sido el conocer y poder comparar cómo es su funcionamiento al variar algunas condiciones como el material con el que se trabaja o la distancia de trabajo. Así mismo, al utilizar los dispositivos simultáneamente, es importante conocer si existen interferencias. El estudio realizado de la precisión y exactitud de los sensores ha permitido conocer en mayor detalle sus prestaciones y ha resultado de gran ayuda para saber cómo deben ser colocados espacialmente para obtener unos mejores resultados.

Para la realización del estudio se han empleado distintos materiales como una caja de cartón, otra de plástico, un palé de madera, otro de plástico, papeles y cartulinas de diferentes colores, un plástico de embalaje, otro de invernadero o una pantalla de portátil. Además, se han realizado las pruebas a dos distancias diferentes para ver cómo varían los datos obtenidos. En concreto, dichas distancias son de 1,5 y de 3 metros. Mediante el estudio de la precisión se ha podido conocer la repetibilidad de los dispositivos, mientras que mediante el de exactitud se ha podido observar el error cometido al estimar la distancia a la que se encuentran los objetos. A modo de ejemplo, en la figura 3 se muestra un diagrama de barras con el error cometido al estimar la distancia a la que se encuentran algunos de los materiales comentados anteriormente cuando están a 1,5 metros. Una recopilación exhaustiva de los resultados obtenidos puede encontrarse en [1].

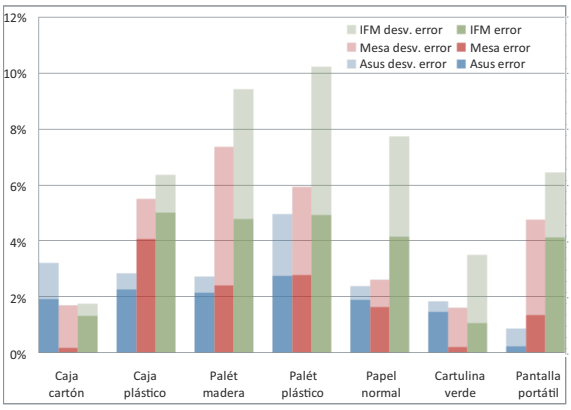


Figura 3: Error de estimación de distancia de los elementos empleados en el estudio cuando la distancia de trabajo es de 1,5 metros.

Como se puede observar, la Asus proporciona resultados muy similares independientemente del objeto utilizado. Esto mismo se ha observado también al analizar la precisión, de lo que se deduce que la tecnología de luz estructurada se ve menos afectada por los cambios en los materiales de trabajo. Sin embargo, las Asus se ven afectadas en mayor medida ante el aumento de la distancia de trabajo. De hecho, los datos tomados mediante la Mesa y la IFM mejoran a la distancia de tres metros respecto de la de un metro y medio. Una de las razones de este comportamiento al aumentar la distancia es que la tecnología de tiempo de vuelo se basa fundamentalmente en medir el tiempo que tarda el rayo emitido en regresar al sensor. Actualmente, se puede medir este tiempo con mucha exactitud, siendo incluso más fácil calcularlo cuando este tiempo es mayor. Otro motivo es el objetivo tan diferente para el que fueron concebidos estos dispositivos. La cámara Asus está

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

pensada inicialmente como un controlador de juegos, para lo cual no es primordial la calidad de los datos obtenidos. Sin embargo, las otros dos son cámaras industriales, por lo que garantizan una mayor precisión y exactitud para las aplicaciones en que son normalmente utilizadas.

Figura 4: A la izquierda la nube de puntos que representa una cartulina vista desde la Asus. En las otras dos imágenes se muestran resultados de la Asus al registrar la cartulina trabajando simultáneamente con la IFM.

Una de las conclusiones extraídas de la realización del estudio es que el dispositivo de IFM afecta en gran medida a la repetibilidad de la Mesa, pero que esto no se produce a la inversa. Esto puede ser solventado mediante una correcta sincronización de las cámaras. Sin embargo, también se han detectado fallos en el comportamiento de las Asus al trabajar a la vez que las IFM. Un ejemplo se muestra en la figura 4. Además, la IFM no presenta un mejor comportamiento en cuanto a exactitud y precisión que los otros dispositivos. A esto se le une que su resolución es considerablemente menor, ya que una nube de puntos tomada mediante ella presenta sólo 3.200 puntos frente a los 307.200 puntos de las Asus. Por todos estos motivos se ha decidido no utilizar las dos IFM PMD 3D en el sistema diseñado.

2.1 CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LOS SENSORES

Un punto importante del sistema a desarrollar es la colocación de los sensores. Esto determina aspectos claves como la distancia a la que trabajan los dispositivos, cómo son las nubes de puntos adquiridas o cómo es la información que se representa en ellas. También hay que tener en cuenta la necesidad de que se produzca un cierto solapamiento entre los elementos situados dentro del campo de vista de cada dispositivo para poder realizar el registro 3D.

Algunas de las decisiones a la hora de cómo colocar las cámaras han venido condicionadas por las conclusiones extraídas del estudio de precisión y exactitud. En dicho estudio se ha comprobado cómo la distancia a la cual trabaja cada dispositivo afecta a la calidad de los datos obtenidos. En concreto, la Asus proporciona mejores resultados cuando menor es la distancia de trabajo. Sin embargo, la Mesa proporciona mejores datos desde el punto de vista de la precisión y la exactitud cuando trabaja a mayores distancias que la Asus.

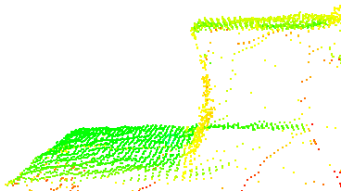


Figura 5: Defecto debido a múltiples reflexiones en una nube de puntos de la Mesa colocada con una orientación inadecuada. Nótese como el lateral de la caja parece ser curvo cuando debería ser plano. Además, la mayoría de los puntos que representan dicho lateral se concentran en la parte inferior.

Por estos motivos, al tener que colocarse todos los dispositivos en una estructura metálica en forma de arco adecuado para su uso en un pasillo, se ha decidido colocar las Asus en los laterales de dicha estructura y la Mesa en la parte superior. Al estar los laterales más cercanos a la carga que el techo, se favorece que las cámaras trabajen a unas distancias de trabajo óptimas.

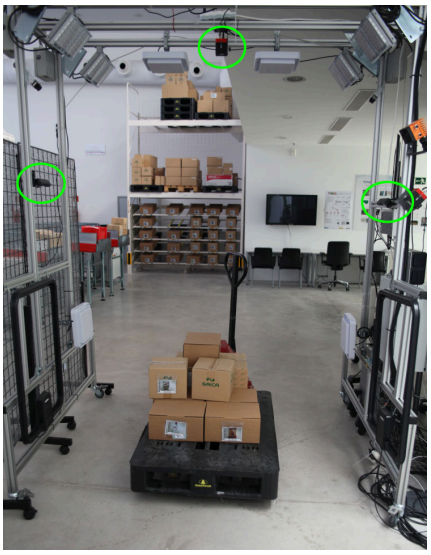


Figura 6: Configuración escogida de los dispositivos. Las dos Asus en los laterales y la Mesa SR 4000 en la parte superior. Las Asus registran la información de los laterales exclusivamente y la Mesa proporciona una vista de la parte superior de la escena, siendo su eje z perpendicular al plano del suelo. Las cámaras han sido señaladas en la imagen con círculos de color verde.

Una vez que se ha determinado la colocación de los dispositivos, falta establecer la orientación con la que enfocan a la carga. En el caso de la Mesa se ha decidido enfrentarla al suelo, es decir, que su eje z se corresponda con la normal al plano del suelo. Esto facilita algunos aspectos del algoritmo desarrollado ya que proporciona una vista cenital de la mercancía y además su eje z se corresponde

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

directamente con la altura de los objetos. Cabe decir que el propio fabricante recomienda orientar la cámara perpendicularmente a los elementos a medir ya que en caso contrario se pueden dar problemas de reflexiones múltiples como se muestra en la figura 5. Las cámaras Asus se encuentran orientadas hacia los laterales de la mercancía pero ligeramente inclinadas ya que se encuentran situadas a una altura mayor (fig. 6).

El único inconveniente que presenta esta forma de colocar las cámaras, es que no se dispone de información ni de la parte delantera ni de la trasera de los elementos a calcular el volumen. Sin embargo, esto no es un problema ya que es suficiente la información de los laterales y de la parte superior del conjunto para poder calcular su volumen.

3 SEGMENTACIÓN DE ESCENA

En primer lugar, es necesario unificar los datos bajo un único formato. El escogido es el *pcd*, que es el que utiliza la librería PCL para trabajar con nubes de puntos, lo cual facilita su manipulación. La propia librería permite manejar las cámaras Asus y a su vez se encarga de la conversión de los datos a este formato. Sin embargo, hay que implementar el código tanto para controlar el dispositivo de Mesa como para realizar la transformación de los datos obtenidos al formato anterior.

Pese a que todas las nubes con las que se trabaja están bajo el mismo formato, éstas son muy diferentes ya que los dispositivos de las que provienen toman los datos de diferente manera. Un ejemplo de esto es el tipo de información que proporcionan las cámaras. En el caso de la Asus, se dispone de un mapa de profundidad y de una imagen de color de la escena. Superponiendo ambas imágenes, se obtiene la nube de puntos 3D en color con la que se va a trabajar. Sin embargo, la Mesa no lleva incorporada cámara RGB, por lo que no proporciona información de color. En su caso, se dispone de un mapa de profundidad y de una imagen de intensidad, obtenida a partir de la diferencia de energía entre el rayo infrarrojo emitido y el recibido al haber sido reflejado en los distintos elementos situados dentro de su campo de visión. Mediante la unión de ambas informaciones se obtiene una nube de puntos 3D con información de intensidad.

Como ya se ha comentado, el objetivo es realizar el cálculo del volumen de una mercancía que está siendo transportada por una transpaleta. Sin embargo, en la escena puede haber mucha información que no es útil para llevar a cabo este cometido: suelo, la propia transpaleta, el palé, etc. Por tanto, resulta necesario el procesar las nubes de puntos para eliminar todos estos elementos.

3.1 EXTRACCIÓN DEL SUELO

Para extraer el suelo se ha empleado un algoritmo ampliamente utilizado como es el RANdom SAmple Consensus (RANSAC) [7]. Sin embargo, en vez de aplicar este algoritmo cada vez que una nube de puntos es tomada por cualquiera de los dispositivos, se ha decidido *calibrar* el plano del suelo mediante el RANSAC la primera vez que son colocadas las cámaras en el emplazamiento de trabajo. De este modo, se puede asegurar que no haya ningún objeto en la escena que no sea estático, es decir, que sólo aparezca el suelo y las paredes. Así se logra que el número de puntos espurios durante el cálculo de la ecuación del plano sea muy bajo y que el plano principal de la escena sea el suelo. Posteriormente, cuando se desee extraer el plano del suelo para calcular un volumen durante el funcionamiento normal del algoritmo, únicamente es necesario eliminar todos aquellos puntos que pertenezcan al plano previamente calculado. Esta forma de eliminar el suelo tiene sentido ya que, una vez colocadas las cámaras, el plano del suelo es siempre el mismo, por lo que no resultaría eficiente el aplicar el RANSAC cada vez que se desea extraer este elemento.

3.2 EXTRACCIÓN DE LA TRANSPALETA Y EL PALÉ

Aunque el suelo es fácilmente identificable, segmentar el resto de elementos puede resultar más complicado. Para poder separar el palé de la mercancía, se ha decidido utilizar la información adicional que proporcionan los dispositivos, la intensidad y el color. Esto ha sido posible gracias a las características del palé utilizado, que está formado por polímeros. Este tipo de palés están siendo cada vez más utilizados ya que son reciclables, con el consiguiente ahorro que esto conlleva. De este modo, características como el color son fáciles de modificar. En el caso del palé empleado, su color es negro, por lo que resulta sencillo identificarlo. A su vez presenta una superficie tratada con un alto grado de especularidad y muy lisa, lo que provoca que la intensidad reflejada en la Mesa sea muy baja en comparación con el resto de elementos.

Por tanto, para las nubes tomadas mediante la Asus de color basta con realizar un filtro de color para eliminar la mayor parte del palé. En el caso de la Mesa, el procedimiento es análogo pero sobre la información de intensidad. Al no disponer de información adicional la cámara Asus Xtion Pro, no se puede utilizar ningún filtro de los anteriores. Por lo que se ha decidido medir la altura a la que se encuentra el palé y eliminar todos los puntos que se encuentren a una altura inferior respecto del plano del suelo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Una vez eliminado el palé, sólo quedan en las nubes de puntos ciertos elementos secundarios junto a la mercancía como parte de la transpaleta o del operario en caso de que apareciese. Para extraerlos, se ha decidido emplear una técnica muy utilizada en el procesamiento de imágenes 2D que es la búsqueda de "blobs" o agrupaciones pero aplicada a 3D [9]. De todas las agrupaciones encontradas, aquella con mayor número de puntos será la formada por la mercancía. En las figuras 7 y 8 se muestran dos ejemplos de procesamiento de nubes de puntos para las cámaras de Asus y de Mesa respectivamente.

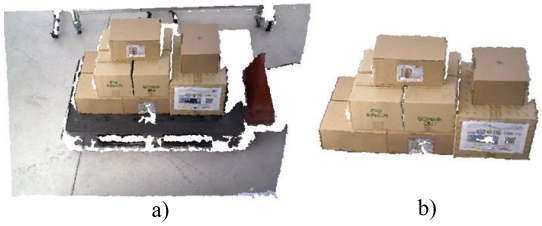


Figura 7: Ejemplo de procesamiento de una nube de puntos adquirida por la Asus Xtion Pro Live.

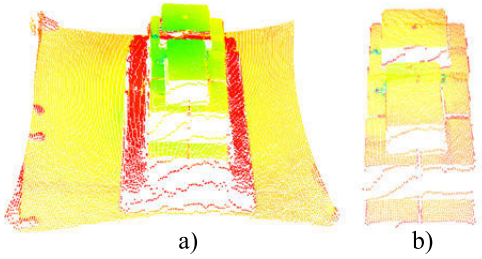


Figura 8: Ejemplo de procesamiento de una nube de puntos adquirida por la Mesa SR 4000.

4 REGISTRO 3D

Una vez que se dispone de todas las nubes procesadas, se tiene toda la información necesaria para calcular el volumen. El inconveniente es que el sistema de referencia de cada dispositivo es distinto, por lo que es necesario juntar todas las nubes bajo un único punto de vista, es decir, realizar un registro (reconstrucción) 3D. El fusionar la información se reduce a encontrar la matriz de transformación que permite cambiar del sistema de coordenadas de una cámara al de otra. Éste es un problema que ha sido ampliamente estudiado [13]. Los pasos a realizar pueden variar en función del tipo de nubes de puntos empleadas y de cómo sea la escena que éstas representan.

La solución adoptada para lograr el registro 3D de la escena sin que afecte a la robustez del sistema consiste en realizar una única calibración inicial de las cámaras. Es decir, cuando se instala por primera vez el sistema, el propio instalador es el encargado de seleccionar los puntos característicos y las correspondencias a utilizar. A partir de éstas, se calcula una primera aproximación de la matriz de transformación. Para ello, se utiliza el algoritmo desarrollado por Arun en 1997 [2] basado en la descomposición en valores singulares.

La matriz de transformación así obtenida se utiliza como semilla del algoritmo "Iterative Closest Point"[4]. Al ser las correspondencias introducidas por el usuario correctas, la semilla utilizada está muy próxima a la solución final, lo que facilita que el ICP converja al mínimo error global y lo haga en muy pocas iteraciones.

De esta forma, se evita el tener que hacer todo el proceso típico de un registro 3D automático cada vez que se calcula el volumen, con el consiguiente ahorro en lo que a tiempo de cómputo se refiere. Esta manera de actuar es posible ya que una vez instaladas las cámaras, las posiciones relativas son siempre las mismas. Por lo tanto, las matrices de transformación que relacionan los diferentes puntos de vistas de las cámaras son constantes. De este modo, una vez que son calculadas sólo es necesario aplicar el cambio de referencia a las nubes de puntos adquiridas por cada uno de los dispositivos.

El calcular las matrices de transformación de forma automática cada vez que se toman nubes de puntos se ha desechado aparte de por el tiempo de cómputo necesario porque no ofrecía suficiente robustez. Esto se debe a que la escena a registrar está compuesta normalmente por cajas. Por lo tanto, la mayoría de los elementos geométricos existentes son planos perpendiculares y paralelos de aspecto muy similar. Además, tanto desde el punto de vista del color como de la intensidad registrada por la Mesa, resulta muy homogéneo todo el conjunto. Esto dificulta considerablemente la obtención de adecuados puntos característicos y de buenas correspondencias al no haber zonas con grandes gradientes o especialmente características. Otra de las razones es que se están utilizando sólo tres cámaras para lograr registrar toda la escena, por lo que el cambio de vista de un dispositivo a otro es grande. De hecho, se está intentado reconstruir un arco de 180º con sólo tres cámaras.

5 CÁLCULO DEL VOLUMEN

A continuación se describen los métodos desarrollados para el cálculo del volumen de la carga.

5.1 MÉTODO VOXEL

Inicialmente, se pensó en dividir toda la nube de puntos en una cuadrícula. De este modo, se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

podrían dar tres tipos diferentes de cubos dentro de la cuadrícula: cubos del interior de los objetos a calcular el volumen que no presentan ningún punto en su interior, cubos que presentan puntos en su interior porque están situados en las superficies de los elementos y cubos situados fuera de la nube de puntos que no tienen ningún punto en su interior. De este modo, si se contabilizasen únicamente los cubos del interior y de la superficie, siendo conocidas sus dimensiones, el cálculo del volumen sería inmediato. Sin embargo, el poder diferenciar aquellos cubos del interior de los del exterior de la nube puede resultar complejo, ya que ninguno de ellos presenta puntos en su interior.

El algoritmo implementado finalmente parte de la idea de dividir la nube de puntos en cubos, pero, en vez de contabilizar aquellos que pertenecen a la nube, lo que se hace es sumar prismas, resultando en una "integración" del volumen. Partiendo del plano del suelo y de la nube de puntos que representa un registro 3D de los elementos que se desea calcular el volumen, los pasos a realizar para calcular el volumen V se exponen a continuación (consultar [1] para más detalle):

- Alinear el eje z de la nube con la normal al plano del suelo.
- Buscar en toda la nube de puntos el punto cuya distancia al plano del suelo sea mínima ($DistMin$), que se corresponde con la cara del palé donde se apoyan las cajas.
- Dividir la nube en celdas (*voxels*), quedando definida la nube únicamente por los centroides de dichas celdas ($LC = LadoCelda$).
- Mientras no se hayan procesado todos los puntos de la nube de puntos original, ejecutar el siguiente bucle:
  1. Se busca el punto de la nube con mayor distancia al plano del suelo que no haya sido procesado aún ($APA = AlturaPuntoActual$).
  2. Se añade al volumen el prisma correspondiente a ese punto:
  $$V+ = LC^2 * (APA - DistMin); \quad (1)$$
  3. Se marca como procesada la celda a la que pertenece este punto, así como a todas las celdas situadas debajo.

5.2 MÉTODO PROYECCIÓN DE PLANOS

El método anterior es válido para cualquier tipo de carga. Sin embargo, uno de los modos más habituales de transportar la mercancía es mediante cajas. Este es el motivo por el que todas las pruebas experimentales han sido realizadas con cajas. Si se realiza la hipótesis de que toda la carga a transportar está empaquetada de esta forma, se puede hacer uso de esta información para desarrollar un nuevo método para calcular el volumen. Al estar formadas las cajas exclusivamente por planos, se puede calcular el volumen mediante su proyección vertical. En concreto, el volumen del conjunto se corresponde con lo que hay debajo de los planos paralelos al suelo, como se observa en la figura 9. Por lo tanto, sólo hace falta conocer todos los planos de la nube y, de los que sean paralelos al suelo, calcular su área. Siendo conocida su altura respecto del palé, se puede computar fácilmente el volumen. Los pasos a realizar para calcular el volumen V mediante este método son:

- Buscar en el registro 3D el punto cuya distancia al plano del suelo sea mínima ($DistMin$), que se corresponde con la cara del palé donde se apoyan las cajas.
- Buscar todos los planos de la nube de puntos de la Mesa SR 4000, que representa la vista cenital.
- Ordenar todos los planos en función de su distancia al origen (la propia cámara).
- Mientras no se hayan procesado todos los planos encontrados, se ejecuta el siguiente bucle:
  1. Extraer el plano (plano referencia) de la nube situado más cercano al origen que no haya sido computado aún ($APR = Altura\ Plano\ Referencia$).
  2. Calcular su área ($A = Area$).
  3. Si hay algún plano (plano actual) por debajo del de referencia, calcular el volumen hasta este plano inferior ($APA = Altura\ Plano\ Actual$).
  $$V+ = A * (APR - APA); \quad (2)$$
  En caso de que no queden más planos por debajo, calcular el volumen hasta la base:
  $$V+ = A * (APR - DistMin); \quad (3)$$

Una dificultad de este algoritmo es el cálculo del área, ya que en ocasiones los planos pueden presentar irregularidades y zonas con concavidades. Existen fórmulas para calcular el área de polígonos irregulares a partir de los vértices si están ordenados. Sin embargo, esta información no es conocida a priori.

La solución adoptada consiste en transformar la nube de puntos 3D en una imagen 2D. Una vez que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

se dispone de ella, es procesada mediante técnicas de visión por computador. En primer lugar, se le aplican algoritmos de "eroding" y "dilating". La segunda coloca puntos nuevos alrededor de los ya existentes originalmente, de modo que la variación en el interior de la imagen es mínima. Sin embargo, los contornos de la imagen se ven desplazados (es como si la imagen se dilatara, de ahí su nombre). El efecto producido por la otra función es justo el contrario. Por lo que finalmente se obtiene la misma imagen que la original, salvo que haya agujeros o zonas no conexas, los cuales se habrán reducido o incluso habrán desaparecido. La utilización de estas funciones permite que la detección de los contornos realizada posteriormente sea mucho más robusta y precisa.

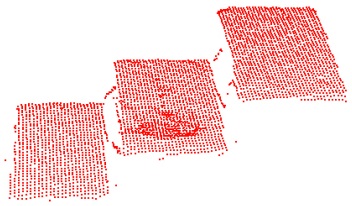


Figura 9: Nube de puntos tomada desde la parte superior de la carga. Representa una vista cenital.

Una vez que se tiene una imagen conexa, se utiliza un filtro de Canny [5] para obtener los bordes de la imagen y posteriormente ordenarlos. Finalmente, se contabilizan los píxeles existentes dentro de cada uno de los contornos mediante una función basada en el *teorema de Green* [8] para calcular el área. Dicha área se encuentra medida en píxeles y ya sólo queda transformarla a m^2 utilizando el escalado entre la imagen 2D y la nube de puntos 3D.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez explicadas cada una de las etapas de las que consta el método desarrollado, falta evaluar la exactitud del volumen calculado. Para ello se han establecido quince situaciones diferentes a estudiar, en las que se ha variado la configuración de la carga desde situaciones muy sencillas, en las que hay una única caja, hasta otras en las que hay hasta once cajas y dispuestas en posiciones muy diversas. En cada una de estas situaciones se ha medido la exactitud del volumen estimado y el tiempo de cómputo necesario utilizando los métodos desarrollados. Los experimentos se han realizado en un ordenador de sobremesa de 64 bits con seis procesadores *Intel(R) Xeon(R) CPU X5650* (2,67 GHz) y con 24 GB de memoria RAM. Cabe decir que el código desarrollado no ha sido optimizado para hacer uso de toda la capacidad computacional disponible en este ordenador.

Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos al aplicar cada método a los quince casos. El término error se refiere al error medio.

Método	Error	Desv. típica
"Convex hull" [3]	50,50%	35,25%
"Voxel grid"	7,40%	3,26%
"Proyección planos"	4,11%	3,48%

En la tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para los dos métodos explicados. En ella se puede observar como el error cometido al calcular el volumen mediante el método "voxel" es bastante aceptable. En concreto, el error medio es del 7,4 %, siendo la desviación del 3.26%, lo cual entra dentro de los límites admisibles para el sistema. El tiempo de cómputo empleado para calcular el volumen varía entre 1 y 5 segundos, en función de la cantidad de carga transportada. En caso de que se restrinja la mercancía a transportar cajas exclusivamente, el método de "proyección de planos" resulta más eficiente y preciso. Los tiempos de cómputo obtenidos mediante este método son los menores de todos (entre 0,4 y 2 segundos). Además, el error medio cometido es sólo del 4,1%.

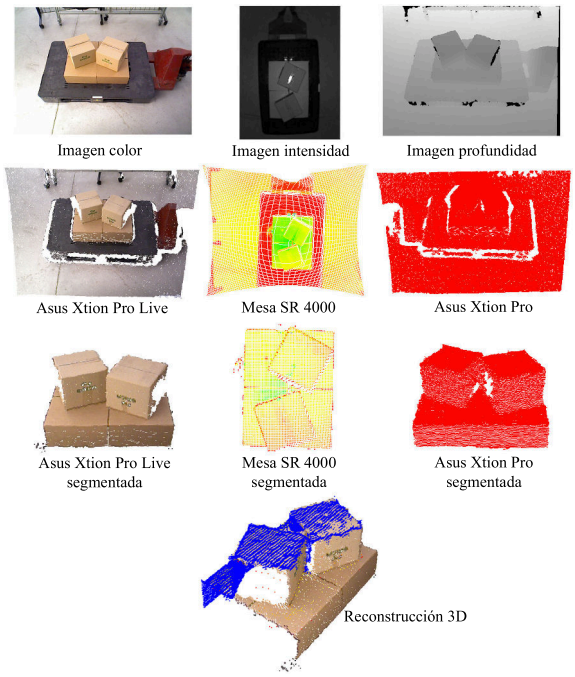


Figura 10: Resumen de los pasos realizados para calcular el volumen para una de las situaciones utilizadas para comprobar la validez del método.

A modo de ejemplo, en la figura 10 se muestra un resumen de los pasos intermedios realizados para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

calcular el volumen en uno de los casos utilizados para evaluar el sistema. El volumen medido en esta configuración es de 67,5 dm^3, siendo la estimación mediante el método "voxel" de 72,5 dm^3 y de 69,3 dm^3 mediante el método de proyección de planos, lo que se corresponde con un error del 7,4% y del 2,7% respectivamente. En [1] se describe una relación más extensa de los experimentos realizados y de los resultados obtenidos.

7 CONCLUSIONES

En vista de los resultados, se puede afirmar que se ha logrado diseñar un sistema robusto y eficiente capaz de calcular el volumen de la mercancía transportada por una transpaleta encima de un palé. Además, se ha superado el reto que supone el trabajar con sensores basados en tecnologías diferentes como son la luz estructurada y la tecnología de tiempo de vuelo. El sistema desarrollado ha sido evaluado experimentalmente estimando el volumen en quince situaciones distintas que abarcan una amplia variedad de posibles configuraciones de mercancías. Los resultados muestran que el sistema diseñado es preciso, con un margen de error menor del 10% de media y con un tiempo de cómputo de unos segundos. Aunque este error puede ser reducido mejorando algunos aspectos concretos del sistema implementado, el margen de mejora es bastante reducido ya que este valor es muy próximo a los errores de medición inherentes a las condiciones de medida y a los propios dispositivos observados en el estudio de exactitud y precisión realizado.

Dados los buenos resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el sistema diseñado, éste ha sido instalado en el Centro Demostrador TIC de Logística del Instituto Tecnológico de Aragón. La aplicación va a ser mostrada a las empresas que visiten estas instalaciones para que comprueben las posibilidades que ofrecen los sensores de rango utilizados para la realización de este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Guillermo López (ITA INNOVA) su ayuda en la realización de este trabajo. El trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y la Unión Europea (DPI2012-31781), por la DGA-FSE (grupoT04) y por el Instituto Tecnológico de Aragón (beca ref. PFCLOGISTICA1-13-458).

Referencias

[1] Artaso, P., (2014) "Tecnologías en cámaras 3D y procesamiento de nubes de puntos para su aplicación en logística", Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza.

[2] Arun, K. S., Huang, T. S., y Blostein, S. D., (1987) "Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, pp. 698–700.

[3] Barber, C. B., Dobkin, D. P. y Huhdanpaa, H., (1996) "The Quickhull Algorithm for Convex Hulls", ACM Trans. Math. Softw., pp. 469–483.

[4] Besl, P. J., y McKay, N. D., (1992) "A Method for Registration of 3-D Shapes", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, pp. 239–256.

[5] Canny, J., (1986) "A Computational Approach to Edge Detection", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, pp. 679–698.

[6] Dellen, B. y Rojas, I. A., (2013) "Volume measurement with a consumer depth camera based on structured infrared light" *16th Catalan Conference on Artificial Intelligence*.

[7] Fischler, M. A., y Bolles, R. C., (1981) "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", Commun. ACM, pp. 381–395.

[8] Kaplan, W., (1991) "Green's Theorem", *§5.5 in Advanced Calculus, 4th ed. Reading, MA: Addison-Wesley*, pp. 286–291.

[9] Kaufman, L., y Rousseeuw, P. J., (1990) "Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis", John Wiley and Sons.

[10] Kolb, A., Barth, E., Koch, R., y Larsen, R., (2009) "Time-of-Flight Sensors in Computer Graphics", *Proceedings of Eurographics*, pp. 119–134.

[11] Lee, D. J., Eifert, J., Zhan, P., y Westhover, B., (2003) "Fast surface approximation for volume and surface area measurements using distance transform", *Opt. Eng.*, pp. 2947—2955.

[12] Rusu, R. B., y Cousins, S., (2011) "3D is here: Point Cloud Library (PCL)", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), China.

[13] Tam, G. K. L., Cheng, Z.-Q., Lai, Y.-K., Langbein, F. C., Liu, Y., Marshall, D., Martin, R. R., Sun, X.-F., y Rosin, P. L., (2013) "Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Non-rigid", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp. 1199-1217.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO DINÁMICO DE UN CUERPO EN MANIOBRAS DE INMERSIÓN

J.A.Somolinos*, A. López, L.R.Núñez, M. Espín

GIT-ERM. Grupo de Investigación Tecnológico en Energías Renovables Marinas
E.T.S. de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid
Arco de la Victoria 4. 28040 Madrid

{joseandres.somolinos, amable.lopez, luisramon.nunez, montserrat.espin}@upm.es

Resumen

Este trabajo presenta el modelado dinámico de un cuerpo aproximadamente cilíndrico en movimiento sumergido y semi-sumergido, incluso en superficie libre (interacción agua-aire) con un único grado de libertad. Se describe brevemente y se indican los principales parámetros de un prototipo experimental construido específicamente para validar los resultados, tanto del modelo dinámico como de diferentes esquemas de control de profundidad y/u orientación. Finalmente se contrastan los resultados de la simulación del modelo propuesto con los resultados experimentales obtenidos en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S. de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras Clave: Modelo dinámico, Validación experimental, Energías Renovables Marinas.

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las Energías Renovables Marinas en particular, y de las Energías Renovables en general, los esfuerzos en abaratar las inversiones mediante nuevas tecnologías permiten actualmente acercar los costos de instalación y explotación a los propios de las energías tradicionales [1]. Los estudios y avances tecnológicos se centran en dos ámbitos principales: i) desarrollar y disponer de nuevas tecnologías para explotar recursos de más difícil acceso y ii) automatizar el mayor número de tareas implicadas en la instalación y explotación.

Los dispositivos de aprovechamiento de las corrientes marinas denominados de primera generación [2] están limitados a aguas no muy profundas, fondeados al lecho marino incluso con instalaciones muy costosas, mientras que los dispositivos denominados de segunda generación [2] tienden a ser flotantes y más ligeros, lo que permite acceder a recursos en aguas más profundas [3,4] y abaratar sus costos, entre ellos, los de instalación.

En general los dispositivos de primera generación están compuestos por un domo en el que se ubican la multiplicadora de velocidad acoplada al rotor o hélice externa, y el alternador eléctrico como elementos principales, junto con elementos de frenado, de cierre, empuje, auxiliares, etc. lo que conlleva que su forma sea aproximadamente cilíndrica. (Ver [5-11]).

Mientras los generadores de segunda generación se configuran como dispositivos flotantes mediante diversas tecnologías de lastres y sistemas de fondeo, algunos de los proyectos actuales de investigación en dispositivos para el aprovechamiento de las corrientes marinas de 2ª generación [12-13] permiten operar en aguas profundas y abaratar los costos de mantenimiento mediante operaciones automáticas de emersión (extracción del generador de la profundidad a la superficie) y de inmersión (colocación del generador en la profundidad desde la superficie) mediante diversas técnicas de manejo de lastres.

Es posible, por lo tanto, reducir también los costos de mantenimiento que requieren los dispositivos de primera generación en su actual concepción, evitando el uso de buques especiales de muy altas prestaciones para tareas de mantenimiento, y automatizando las tareas de emersión y de inmersión, lo que permitirá el uso de buques de propósitos más generales, con menores prestaciones, y por ello, menos costosos.

Para automatizar estas maniobras se requiere en primer lugar, dotar a los dispositivos de elementos sensores y de accionamiento que provoquen fuerzas y/o pares para el cambio de profundidad y/u orientación, así como el conocimiento de las dinámicas de este tipo de cuerpos en las mencionadas maniobras de emersión/inmersión. (Véase [14]).

Como primer paso, en este trabajo se presenta el modelado dinámico de un cuerpo aproximadamente cilíndrico sumergido o semi-sumergido en movimiento, incluso en su interacción con la superficie libre. Se pretende un modelo dinámico muy sencillo con buena correspondencia con la respuesta real y que permita el diseño de reguladores simples y de fácil implantación (Véase [15], p.e.).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Este trabajo está organizado como sigue: en el siguiente apartado se presenta el modelo dinámico propuesto, en la sección 3 se indican los parámetros principales de simulación para dar paso a una pequeña descripción de un prototipo experimental diseñado y construido al efecto en la sección 4 y la presentación de los resultados experimentales de validación del modelo en la sección 5.

2 MODELO DINÁMICO

Siguiendo el criterio del comité técnico internacional AEN/CTN 206/SC 114 de Energías Marinas–convertidores de energía de olas y mareas [16], el sistema de referencia utilizado para la representación de la posición y orientación se define como sigue:

- Las coordenadas del prototipo están definidas con respecto al sistema de referencia fijo $\{S_0\}$ con la orientación siguiente:
  - Eje X perpendicular al plano del generador, horizontal y según el sentido de la corriente.
  - Eje Z vertical hacia arriba.
  - Eje Y formando un sistema dextrógiro.
- Se considera cota z = 0 al nivel de la superficie del mar.

Sirva la figura 1 para mostrar de forma esquematizada las principales magnitudes que intervienen sobre el cuerpo que se desea modelar.

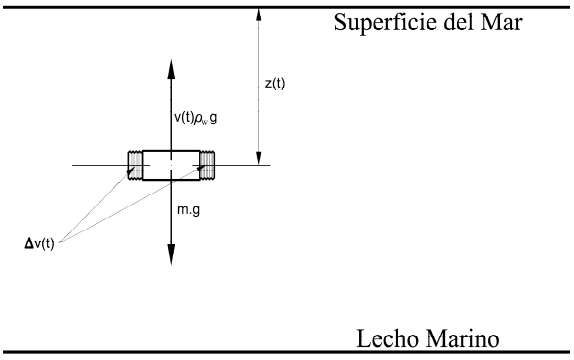


Figura 1: Esquema general de un cuerpo sumergido

Así pues, un cuerpo con forma cilíndrica, y al cual se le dota de un único grado de libertad (gdl) en el movimiento (en nuestro caso, únicamente su profundidad o componente z), puede esquematizarse según la figura anterior. En esta figura se indican las principales fuerzas que intervienen sobre el cuerpo, básicamente fuerzas de empuje, que son función del volumen de carena V (t), y la fuerza debida a la acción de la gravedad. También se ha representado de un modo muy simplificado el sistema de accionamiento seleccionado, que no son más que sendos émbolos que trabajan provocando fuerzas de empuje incrementales de carena con respecto al volumen nominal del cuerpo. Se han descartado otras alternativas para el manejo de fuerzas hidrostáticas, tales como el manejo de lastres con bombas, el uso de membranas en tanques semiabiertos, o el soplado por aire comprimido en tanques abiertos, debido principalmente, a la menor controlabilidad de éstos.

La ecuación que rige la dinámica de un cuerpo sumergido/semi-sumergido de un único gdl viene dada por la ecuación siguiente:

$$\sum_i f_i(t) = \left(m + m_{add}\right)\cdot \ddot{z}(t) + \nu \cdot sign\left[\dot{z}(t)\right]\cdot \left|\dot{z}(t)\right|^2 + \gamma_0 \cdot z(t) \quad (1)$$

Detallando las fuerzas que intervienen a continuación:

$$f_1(t) = -m \cdot g \quad (2)$$

$$f_2(t) = V(t) \cdot \rho_w \cdot g \quad (3)$$

$$V(t) = V_0 + \gamma_0 \cdot z + \Delta V_u(t) - V_{flot} \quad (4)$$

$$m_{add} = m_{add}(z) = k_m(z) \cdot m \quad (5)$$

$$\rho_w = \rho_w(z) \quad (6)$$

$$V_{flot} = V_{flot}(z) \quad (7)$$

Donde cada variable indicada representa: (Entre paréntesis se indica la variable de dependencia).

z(t)	Profundidad del centro geométrico del cilindro sumergido. Es función del tiempo.
m	Masa del cuerpo a controlar. Es constante.
$m_{add}(z)$	Masa añadida. Se considera función de la profundidad, con variación en las cercanías de la superficie libre.
ν	Coeficiente de fricción viscoso considerando fricción cuadrática con la velocidad.
g	Constante de la gravedad.
V(t)	Volumen sumergido. Al incluirse los cambios sobre él, es función del tiempo.
V_0	Volumen nominal del cilindro fuera del agua y a presión atmosférica. Es constante.
$k_m(z)$	Coeficiente que relaciona m_{add} con m.
γ_0	Coeficiente de compresibilidad del cilindro, que se considera constante y positivo.
$V_u(t)$	Volumen de control. Accionado por un conjunto controlado motor-husillo-émbolos.
$V_{flot}(z)$	Volumen no sumergido del cilindro. Es función directa de z. También es $V_{flot}(t)$.
ρ_w	Densidad del agua. Se considera constante.

2.1 MODELADO DE LA MASA AÑADIDA

El término de masa añadida se introduce para modelar el aparente incremento de inercia que sufren los cuerpos cuando están sumergidos en fluidos viscosos. La aceleración que se obtiene de un cuerpo cuando se le aplica una fuerza es menor cuando éste

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

está sumergido en un fluido con viscosidad mayor que la que se obtiene en otro fluido menos viscoso. De un modo más riguroso, la masa añadida se modela en función de la forma del cuerpo sumergido, del valor y dirección de la velocidad relativa del cuerpo en el fluido y de su viscosidad, generalmente a partir del número adimensional de Reynolds.

Sin embargo, la generalización de esta masa añadida a las condiciones en las que el cuerpo no está completamente sumergido (lo que se ha denominado superficie libre), resulta muy compleja, habida cuenta que las velocidades del fluido son muy diferentes en unos puntos frente a otros además de la presencia de fenómenos fuertemente no lineales como vórtices, turbulencias, efectos de la tensión superficial, etc. Por ello, en este trabajo se ha optado por modelar esta masa de forma interpolada entre el valor cuando el cuerpo está completamente sumergido en un rango de velocidades y cuando el cuerpo está totalmente fuera del agua, el cual se considera nulo.

La figura 2 muestra dos funciones interpoladoras del coeficiente k_m en un amplio rango de profundidad, que relaciona la masa añadida con la masa real del cuerpo (véase la ec. (5)): i) una curva de Bézier de orden 3 y ii), una función cosenoidal, ambas con dos valores iniciales de interpolación distintos de partida para un cuerpo cilíndrico de radio R = 0.1 m.

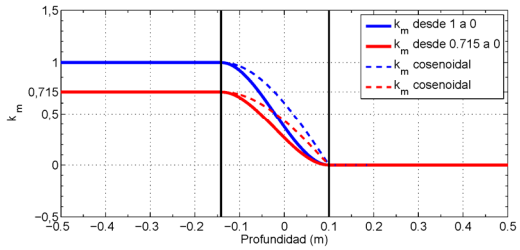


Figura 2: Interpoladores del coeficiente k_m

2.2 PÉRDIDA DE FUERZA DE EMPUJE

El volumen no sumergido es el responsable de la pérdida de empuje y su cálculo para un cilindro en disposición horizontal es muy sencillo a partir de la figura 3 siguiente, donde se muestra una sección semi-sumergida:

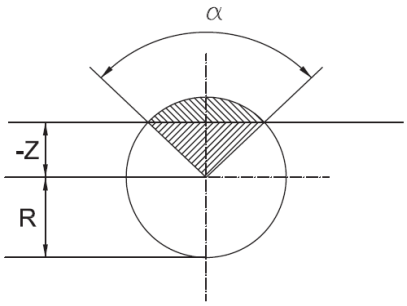


Figura 3: Sección no sumergida de un cilindro.

El volumen que representa la pérdida de empuje se obtiene fácilmente de la figura anterior, resultando, con el criterio de signos empleado en este trabajo:

$$V_{flot} = L \cdot \frac{R^2}{2}\left[\alpha - sin(\alpha)\right] \quad (8)$$

$$\alpha = \pi - 2 \cdot arcsin\left(\frac{-z}{R}\right) \quad (9)$$

La figura siguiente muestra $V_{flot}/(LR^2/2)$ en función de la profundidad z y para el rango $-1 \leq z/R \leq 1$ de un cilindro de una longitud L concreta. Obsérvese que para $z \leq -R$ no existe volumen no sumergido y que para $z \geq R$ el cilindro se encuentra totalmente fuera del agua.

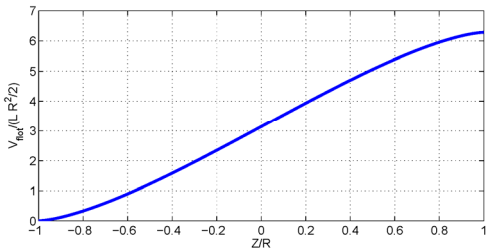


Figura 4: Forma de la pérdida de empuje.

2.3 ELEMENTOS NO MODELADOS

Los elementos que han sido tenidos en cuenta para su modelado y que finalmente han sido descartados de incluirse o simplificados en el modelo dinámico propuesto, son los siguientes:

- ρ_w: La densidad del agua es función de la profundidad, de la temperatura y de la salinidad. Se considera en este documento como constante, dado que las curvas picnoclinas correspondientes a diversas ubicaciones indican variaciones mínimas entre 1023 y 1028 kg/m^3 para profundidades de más de 1000 m.
- γ_0: El coeficiente de compresión indica la reducción de volumen por el efecto de la presión hidrostática. Su muy pequeño valor para las profundidades de trabajo podría recomendar su eliminación del modelo, sin embargo, este coeficiente no nulo, incluso constante, permite incluir en el modelo la inestabilidad intrínseca de cualquier cuerpo sumergido.
- Fuerzas de Basset. A tenerse en cuenta cuando el cuerpo sufre aceleraciones como es el caso que nos ocupa. Su pequeño valor permite poder ser despreciado ante el resto de fuerzas que intervienen.
- Tensión Superficial. De nuevo su valor es, con respecto a los valores de los parámetros manejados, muy pequeño, de modo que de nuevo también se desprecia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.4 MODELO DINÁMICO COMPLETO

Finalmente, el modelo general propuesto en la ecuación (1) con los valores de fuerzas dados en las ecuaciones (2) a (7) se representa en forma de diagrama de bloques en la figura 5 siguiente. En ella se indican los dos términos principales dependientes de la profundidad: el volumen no sumergido como un término aditivo y la masa añadida como un elemento que modifica la inercia del cuerpo, por lo que se representa como una dinámica variable dependiente de la salida. Se muestran también las variables de entrada $\Delta V_u(t)$ y de salida z(t) correspondientes.

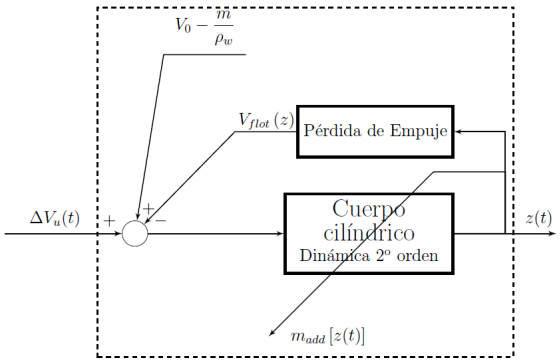


Figura 5: Modelo dinámico propuesto.

3 PARÁMETROS PRINCIPALES PARA LA SIMULACIÓN

El modelo dinámico anterior se ha implementado para simulación en el entorno MATLAB-Simulink©. Los parámetros físicos utilizados corresponden con los del prototipo experimental que se utilizará posteriormente en los ensayos. Éstos son los siguientes:

- m = 19 [kg].
- R = 0.1 [m] (Radio exterior del cilindro).
- L = 0.608 [m] (Longitud nominal del cilindro).
- $V_0 = 19 * 10^{-3}$ [m^3].
- $\rho_w = 1000$ [$kg * m^{-3}$].
- m_{add}. Su coeficiente k_m que lo relaciona con la masa m en forma de curva de Bézier de orden 3 resulta: $k_m(z) = 142.14z^3 + 8.83z^2 - 6.03z + 0.37$ en el rango $-R\sqrt{2} < z < R$, siendo R = 0.1 m.
- $V_{flot}(z)$ coincide con el valor indicado en las ecuaciones (8-9) para los valores de R y L dados.
- ν. A partir de su número de Reynolds, el cual se acota de forma aproximada entre $2*10^3 \leq Re \leq 2*10^4$ para el rango de velocidades esperado, y conocida la forma del cuerpo a sumergir, se obtiene ν = 52 para las unidades utilizadas.
- g = 9.8 [$m * s^{-2}$].
- $\gamma_0 = 10^{-6}$ [$m^3 * m^{-1}$] que es equivalente a 0.1 litros por cada 100 m de profundidad.

4 PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Los principales objetivos de diseño del prototipo experimental a construir, que brevemente se describen a continuación de un modo resumido, fueron los siguientes:

- Sus dimensiones han de ser adecuadas al Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S. de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid (CEHINAV).
- Servir de base para el estudio experimental de dinámicas de cuerpos sumergidos y semi-sumergidos en CEHINAV.
- Servir de base para la experimentación de algoritmos de control de profundidad y de orientación en CEHINAV.
- Ha de estar fuertemente instrumentado para medir y registrar el mayor número de magnitudes necesarias para su control y posterior análisis.
- Debe disponer de un sistema de accionamientos modular que facilite su montaje/desmontaje, y sea intercambiable, ampliable y/o modificable.
- El computador debe ir embarcado a bordo, ya que se desea una mínima presencia de cables al exterior que alteran la dinámica del conjunto.
- Ha de ser fácilmente integrable en otros prototipos de mayor número de gdl y diversas formas hidrodinámicas con 2, 3 ó más torpedos.
- Se desea un uso muy eficiente de los recursos humanos disponibles para el diseño y desarrollo.

La figura 6 muestra el aspecto exterior final del prototipo de 2 gdl que ha sido construido por el Grupo de Investigación Tecnológico en Energías Renovables Marinas GIT-ERM de la U. Politécnica de Madrid. En este trabajo, los dos conjuntos de accionamientos funcionan de modo solidario y sólo se dota al prototipo de un único grado de libertad.

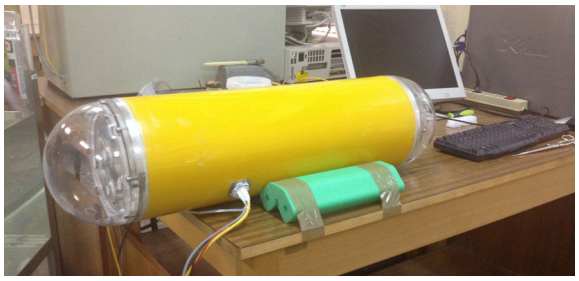


Figura 6: Aspecto exterior del prototipo.

Sus dimensiones corresponden con las indicadas en el apartado anterior, si bien al cilindro base se le han añadido a cada uno de los extremos, semiesferas transparentes que permiten el paso de agua del exterior al sistema de accionamientos (agua atrapada) y que asumen la función de carenado para reducir fenómenos indeseados como vórtices, turbulencias y otras no linealidades.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El sistema de accionamentos lo conforman dos conjuntos de cuatro émbolos cada uno situados a ambos extremos del cilindro. Éstos son accionados por un conjunto motor de CC RE30 y reductora GP42B, ambas de MAXON© y un husillo de diseño propio que convierte el movimiento circular en lineal. El control realimentado de la posición de los émbolos se lleva a cabo en el servocontrolador EPOS2 50/2 del mismo fabricante, a partir de las medidas del codificador acoplado al eje del motor y las consignas generadas por el usuario o por el bucle de externo de control de profundidad y/u orientación.

El sistema sensorial propiamente dicho está formado por un sensor de presión absoluta E13-VF de DPF Sensors© en cada uno de los lados del cilindro, a partir de los cuales se reconstruye la profundidad del prototipo. Estos sensores, junto con los finales de carrera, se conectan a los correspondientes canales Entrada/Salida de su controladora EPOS2 asociada. Las dos unidades EPOS2 se conectan entre sí mediante CANBus y la unidad que se toma como maestra hace lo propio con el computador central, un controlador empotrado National Instruments CRIO NI 9074 con módulo de comunicación CANBus NI 9853. Un inclinómetro tridimensional Microstrain 3DM-GX4-25 ubicado en el interior del cilindro permite obtener la matriz de rotación 3D del prototipo a través de una conexión RS-232 al computador central mediante el módulo NI 9870. La figura 7(izda.) muestra un módulo completo de accionamientos desmontado del prototipo junto con su correspondiente sensor de profundidad, mientras que la figura 7(dcha.) muestra el aspecto exterior de este mismo módulo ya montado, habiendo sustraido la carena semiesférica para mejor visualización.

Figura 7: Vista general y exterior de uno de los conjuntos modulares de accionamiento.

La información al/del prototipo se envía mediante conexión Ethernet por cable CAT 5e+, siendo ésta, junto con la alimentación externa de 24 V CC la única conexión al exterior. Un PC Dell Vostro con procesador Core 2 Duo (2.33GHz, 1333Mhz FSB, 4MB cache) bajo el sistema operativo Windows XP SP4 dotado del entorno de desarrollo National Instruments LabView 2012, y los paquetes Real-Time Module y FPGA Module, entre otros, permiten el desarrollo de los algoritmos de control, procesamiento y registro de las distintas señales, monitorización de la información, supervisión de alarmas y gestión y conversión de los distintos ficheros necesarios para el funcionamiento que se desea de este prototipo de investigación.

Como último aspecto a destacar en este apartado, la figura 8 muestra el aspecto CAD de las carcasas exteriores y del subsistema de unión entre ellas del prototipo de 3 gdl actualmente en fabricación. Uno de los torpedos de este prototipo, al que se denomina torpedo maestro, estará constituido por el prototipo presentado aquí, uniéndose a los otros dos torpedos mediante la conexión CANBus indicada y el sistema de barras mostrado en la misma figura 8.

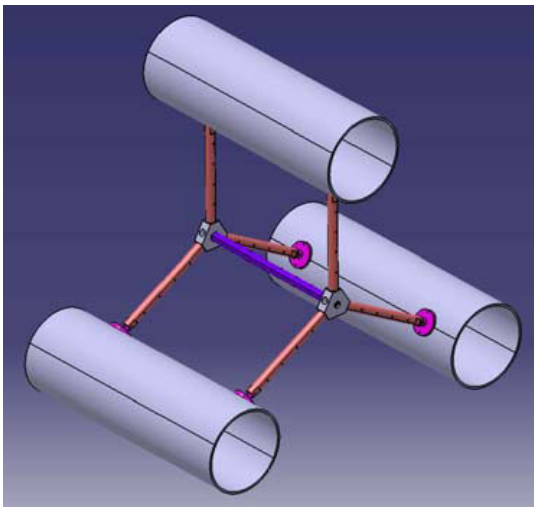


Figura 8: Aspecto de las carcasas y barras del prototipo de 3 grados de libertad.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los ensayos para la validación del modelo dinámico presentado anteriormente se han llevado a cabo en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S. de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid (CEHINAV). Es de los denominados de aguas tranquilas, y sus dimensiones principales son: 100 m de largo, 3.8 m de ancho y hasta 2.2. m de profundidad. Dispone de un carro servocontrolado dotado de muy diversos sistemas de instrumentación para realización de múltiples ensayos de canal, así como un generador de olas, entre otros elementos.

Se han tomado múltiples registros de las señales del prototipo en maniobras de emersión aplicando diferentes fuerzas de empuje mediante el posicionamiento de los accionamientos en la posición correspondiente. Las figuras 9 a 12 muestran las respuestas del prototipo para una profundidad inicial

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de -1.945 m y desplazamientos de volumen (en litros) ΔV_u = -0.05, -0.1, -0.2 y -0.3, respectivamente, junto con las obtenidas mediante la simulación en el entorno MATLAB-Simulink© del comportamiento dinámico del modelo descrito en la sección 2.

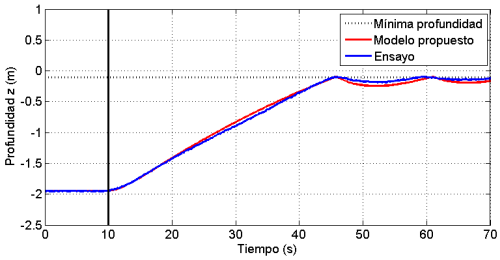


Figura 9: Respuesta experimental y de simulación para ΔV_u = -0.05 litros

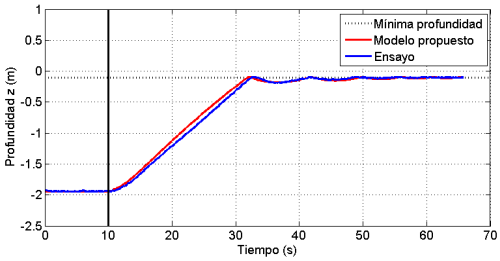


Figura 10: Respuesta experimental y de simulación para ΔV_u = -0.10 litros

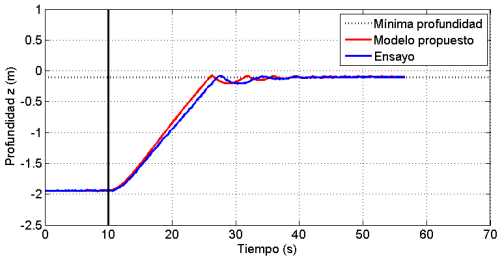


Figura 11: Respuesta experimental y de simulación para ΔV_u = -0.20 litros

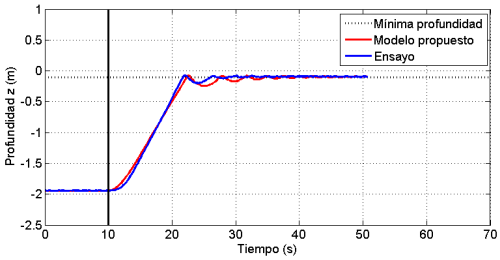


Figura 12: Respuesta experimental y de simulación para ΔV_u = -0.30 litros

Puede comprobarse la muy alta correspondencia de las señales medidas y registradas en los ensayos experimentales en comparación con las obtenidas mediante simulación, lo que permite dar por validado el modelo dinámico propuesto, así como los parámetros utilizados y los descartes o simplificaciones del resto de parámetros conforme al apartado 2.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el modelo dinámico de un cuerpo sumergido o semi-sumergido de forma aproximadamente cilíndrica. El modelo propuesto considera los efectos de la inestabilidad intrínseca de cualquier cuerpo sumergido y propone un método de interpolación para el cómputo de la masa añadida incluso en superficie libre. Estos términos, junto con el cómputo de la pérdida de empuje, permiten modelar el comportamiento de un cuerpo sumergido o semi-sumergido de forma muy simple, lo que conlleva reguladores para el control de profundidad y/u orientación también de pequeña complejidad y fácil implantación. Se ha presentado brevemente un prototipo especialmente diseñado y construido para estudiar comportamientos dinámicos tanto en bucle abierto como en bucle cerrado con uno o dos grados de libertad. Los resultados experimentales obtenidos en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S. de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid permiten validar el modelo dinámico propuesto y justificar que no se requieren modelos más complejos. En la actualidad se trabaja en implementar sistemas de control de posición y/u orientación ya comprobados en el prototipo propuesto y en un prototipo de 3 grados de libertad que es resultado de la generalización del prototipo aquí presentado, y que tiene aplicación directa al estudio del comportamiento en maniobras de un generador de energía eléctrica para el aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas, el cual se encuentra en fase avanzada de desarrollo fruto de la colaboración Universidad-Empresa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo la concesión DPI2011-24113. Los autores quieren agradecer el trabajo a Fernando Rodríguez Vicente, al personal técnico de CEHINAV y al Profesor Juan Carlos Suárez por asesorar y facilitar los adhesivos para el prototipo.

Referencias

[1] Núñez R. Luis R., (2012). *El aprovechamiento de las energías renovables marinas como opción tecnológica de futuro*. Revista de Economía Industrial. 4º Tr. 2012. Mº Industria, Energía y Turismo.

[2] López, A. et al. (2014): *Modelado Energético de Convertidores Primarios para el aprovechamiento de las Energías Renovables marinas*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial. Vol.11, No.2.Pp.24-35.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[3] Núñez, L. R. et al.(2010), *The GESMEY ocean current turbine. A proposal for marine current energy extraction on deeper waters*. 3rd International Conference on Oceanic Energy.

[4] Spanish Patent and Trademark Office. (2008): Patent number concession nº ES2284411. UPM. OEPM. Madrid.

[5] http://www.hammerfeststrom.com. *

[6] http://atlantisresourcesltd.com. *.

[7] http://www.alstom.com/power/renewables/ocean-energy/tidal-energy. *.

[8] http://www.voith.com/en/products-services/hydro-power/ocean-energies/tidal-current-power-stations--591.html. *.

[9] http://verdantpower.com. *.

[10] http://www.swanturbines.co.uk. *.

[11] http://www.tidalenergyltd.com. *.

[12] Somolinos, J.A. et al. (2010) *Automatic System for Underwater Ocean Current Turbines. Application to GESMEY* 3rd International Conference on Ocean Energy 2010.

[13] Somolinos, J.A. et al. (2009): *Simulation of the emersion procedure for a new underwater generator*. International Workshop on Modelling and Applied Simulation. Pp 197-202. Puerto de la Cruz, Spain.

[14] López, A., et al. (2011), *Dynamic behaviour of a second generation hydrokinetic converter* IEEE OCEANS. ISBN: 978-1-4577-0087-3.

[15] Somolinos, J.A. et al. (2002) *Design, dynamic modelling and experimental validation of a three-dof flexible arm*. Mechatronics Vol. 12, Issue 7 pp. 919-948

[16] IEC-TC214, 2011. *Technical Specification: Marine energy. Wave, tidal and other water current converters. Part 1: Terminology*. IEC/TS 62600-1Ed.International Electrotechnic Commission. Ginebra, Suiza

*. Consultados el 27/06/2014

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA

Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, J.J. Fernández-Lozano, A. García-Cerezo
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
Calle Dr. Ortiz Ramos, s/n, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, jfl@uma.es

Resumen

La movilidad en las ciudades se ve comprometida por un tráfico cada vez más elevado y unas infraestructuras que no pueden ampliarse. Por tanto, la mejora de la movilidad y su sostenibilidad deben venir de la mano de una mejor gestión de los recursos, con la incorporación de estrategias de control del tráfico que se adapten en cada momento a sus condiciones. El principal obstáculo está en la obtención de esa información. Una posibilidad son las redes de sensores inalámbricos, que pueden aportar información sobre las condiciones en una zona de interés, con vistas a una planificación más eficiente y al despliegue de algoritmos de control más elaborados.

Palabras Clave: redes de sensores, movilidad, control inteligente, ITS.

1 INTRODUCCIÓN

El tráfico urbano es uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida de los residentes en las ciudades y áreas metropolitanas de los países desarrollados, debido al modelo de ciudad, muy distribuido, y al incremento de población urbana. Ambos factores se realimentan, contribuyendo al aumento de los desplazamientos y su longitud, en un proceso expansivo descrito que ha colocado al medio urbano en una situación difícil en términos de sostenibilidad, en donde la polución, la congestión del tráfico y los accidentes constituyen externalidades negativas de fuerte impacto en la salud y la economía de los ciudadanos. Todos estos problemas aconsejan el desarrollo de nuevas estrategias globales para un transporte urbano sostenible. Estrategias que contemplen no sólo una amplia gama de medidas paliativas, sino, también, *el uso de tecnologías e infraestructuras innovadoras*. El concepto de un transporte eficiente, eficaz y seguro se impone hoy en las nuevas políticas de transporte.

Uno de los principales obstáculos a la implementación de nuevas estrategias de gestión del transporte, y en concreto del control del tráfico urbano, es la información limitada de la que se dispone. Los sensores que se emplean en la monitorización del tráfico pueden encuadrarse en dos grupos (Tubaishat et al., 2009):

- Sensores intrusivos, como espiras soterradas en la calzada, magnetómetros, o tubos neumáticos. Se instalan directamente en el pavimento, bien enterrándolos bajo la superficie o anclándolos al asfalto. Su precisión es buena, pero tienen un coste elevado al requerir instalación.
- Sensores no intrusivos, como video-cámaras, radar de microondas, láser, o ultrasonidos. Pueden ofrecer un conjunto de información más amplio, implicando el procesamiento de la información, pero habitualmente son complejos y con elevadas necesidades de potencia, y sus prestaciones se degradan en condiciones climáticas adversas.

Sobre la base de esta información sensorial se construyen los esquemas de gestión del tráfico que se emplean actualmente en las ciudades. Estos esquemas definen los ciclos y los tiempos en los cruces semafóricos, que actúan como elementos de control. Existen varias formas de fijar los parámetros de un ciclo semafórico:

- Planificación fija. Se definen el ciclo y los repartos una sola vez, que se mantiene en el tiempo.

- Planificación dinámica. Se definen diversos conjuntos de ciclo y repartos, que se cambian a lo largo del tiempo. Habitualmente se diseña un número limitado de ellos (dado que el proceso de diseño tiene un elevado componente heurístico, aunque se parte de los datos recabados por los sensores que pueda haber instalados, que suelen ser intrusivos), y se conmutan de acuerdo con la experiencia de los centros de control. Como máximo, se hacen cambios horarios.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Planificación adaptativa. Los ciclos y repartos se definen en tiempo real de acuerdo con las condiciones del tráfico reinantes, de acuerdo con algoritmos de control. Es la estrategia más prometedora en cuanto a la optimización de la infraestructura, pero choca con la necesidad de disponer de gran cantidad de información en tiempo real, y que esta información sea fiable.

El principal obstáculo para hacer que las planificaciones cambien adaptándose a las condiciones del tráfico está precisamente en conocer cuantitativamente cuáles son esas condiciones. Si bien los núcleos de cierto tamaño suelen contar con sensores intrusivos instalados (habitualmente en la forma de espiras soterradas), la información recabada es muy limitada:

- No se obtiene información de todas las vías: en caso de existir sensores instalados, éstos se limitan a las vías principales.

- Los sensores con los que se cuenta (habitualmente espiras soterradas) son razonablemente precisos en la estimación del número de vehículos, pero tienen un rango de observación limitado: solamente cuentan los vehículos que pasan por el carril en el que están instalados. No se dispone de información acerca de tamaños de colas, o incluso velocidades de tránsito.

- No se dispone de información procedente de los vehículos, que pueden enriquecer la imagen de conjunto del problema, al tiempo que ofrecer una realimentación decisiva para una gestión del transporte en los núcleos urbanos.

Avanzar en los accesos y en las interconexiones de algunos núcleos), exige conseguir más y mejor información, y a un coste que pueda afrontarse desde las administraciones implicadas.

En los últimos años se han venido proponiendo diversas aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) a los problemas de transporte (Arief et al., 2007). Pero habitualmente se centran en el estudio de la red en sí, planteándola como una alternativa para sustituir completamente los sistemas de gestión actuales (ver, por ejemplo, Joseph, 2006; Bera 2009; Chandrasekaran, 2010; Tacconi, 2010; o Dimitrakopoulos, 2010). Además, suelen exigir la incorporación de elementos a bordo de los vehículos. En cambio, la madurez de la tecnología de redes de sensores (ver por ejemplo Akyildiz, 2002 o Xu, 2002) permite plantear el desarrollo de aplicaciones eficientes y que puedan plantearse resolver problemas concretos, más allá del ámbito de la investigación básica, y que no exijan modificaciones sustanciales tanto de la infraestructura como de los vehículos actuales.

El presente trabajo está estructurado como sigue. Tras esta introducción, se describe la arquitectura del sistema móvil de información propuesto. A continuación se trata la implementación de dicho sistema. La siguiente sección presenta un apartado de validación y pruebas reales completadas hasta el momento. Por último, se cierra el documento con las conclusiones.

2 SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN URBANA

El objetivo del sistema se enuncia como caracterizar el flujo de vehículos, y su reparto por las diferentes vías, en una zona de interés, mediante el cálculo de la matriz de origen-destino (en adelante matriz O-D). Para ello se plantea el diseño de un sistema basado en una red de sensores inalámbricos que pueda desplegarse fácilmente en el entorno del que se desea obtener información. Estos sensores deberán ser no intrusivos, y permitir obtener una información tan fiel como sea posible bajo la premisa de la flexibilidad del sistema en su conjunto.

2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Para alcanzar el objetivo, se ha concebido un sistema modular, de manera que pueda reconfigurarse la topología de la red de sensores según las necesidades del viario bajo estudio. La modularidad comprende tanto el número de nodos de la red como el número y tipo de sensores en que se basa. La red cuenta con un nodo receptor encargado de configurar la red, y un conjunto de nodos transmisores, que serán los que se unan a la red creada por el nodo receptor (ver Figura 1). Una vez que se ha establecido la red, cada nodo transmisor realizará la adquisición y procesado de los datos según su programación. Por último, enviará una trama al nodo receptor la cual contendrá la información necesaria ya procesada.

Los nodos transmisores incorporan los sensores del sistema, y cuentan con un microprocesador con capacidad suficiente para obtener, guardar, analizar y enviar los datos ya procesados en forma de tramas. A la hora de definir el conjunto de sensores empleados, se ha buscado obtener una información tan exacta como sea posible del flujo de vehículos. Actualmente solamente los escáneres láser o los radares ofrecen una información exacta del flujo, y aun así solamente en determinadas circunstancias. Son además sensores caros que no casan bien con el objetivo de sencillez y facilidad de despliegue del sistema que se ha mencionado antes. Por tanto, se ha elegido una estrategia distinta en la configuración de la batería sensorial. Se ha elegido como sensor primario la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

detección de dispositivos Bluetooth. Estos dispositivos son cada vez más frecuentes, y permiten al mismo tiempo una identificación exacta del usuario de la vía, a través de la dirección de acceso al medio (MAC), lo que posibilita aplicaciones del tipo de la identificación de matrices O-D, o estimación del número de ocupantes de un vehículo. Sin embargo, no todos los vehículos tienen montado uno de estos dispositivos, ni todos son visibles. Por ello se completa el sistema con otros sensores, como ultrasonidos, o gases. Los sensores de ultrasonidos permiten detectar el número de vehículos que atraviesan su haz de detección. Los sensores de gases detectan la presencia de NOx, CO, CO2, VOC, O3 u O2. También se usan sensores de ruido, luz y polvo. Con todo ello se genera una imagen sensorial del entorno que permite caracterizar el flujo de vehículos, y elaborar una estimación del mismo en base a las lecturas de los diversos sensores y su fusión. Para poder caracterizar esta estimación se incorpora también un nodo con un láser, que en la fase de desarrollo permite contrastar las medidas de los demás sensores, si bien el objetivo es conseguir estimaciones fiables prescindiendo de él.

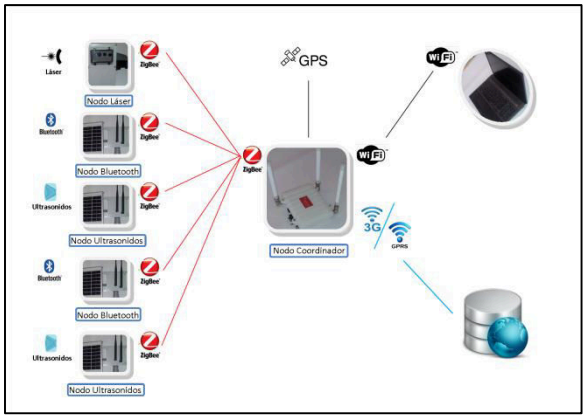


Figura 1: Topología del sistema.

2.2 IMPLEMENTACIÓN

Para el desarrollo de la red de sensores inteligentes inalámbricos se ha partido de una solución hardware desarrollada por la compañía *Libelium*. El *nodo receptor* está basado en el router multiprotocolo *Meshlium* y configurado para que pueda trabajar con los protocolos *ZigBee, WiFi, Bluetooth y 3G/GPRS*, funcionando todo a la vez sin que haya interferencias entre los protocolos. Este router tiene una capacidad interna de almacenamiento de 32GB y la posibilidad de sincronizar las tablas de sus bases de datos con bases de datos externas en un servidor externo que se ha configurado para la aplicación. Además, el router *Meshlium* hace la función de coordinador, configurando la red de sensores inteligentes inalámbricos y permitiendo o no, que se unan a la red los nodos transmisores. Cuenta además con la posibilidad de funcionar autónomamente en cuanto a la energía, gracias a una batería de 12V y un kit solar.

Para los nodos transmisores se ha seleccionado como base el modelo de placa *Waspmote V1.2*. A esta placa se le acopla un módulo de comunicaciones inalámbricas XBee Pro S2 desarrollado por la compañía Digi. Entre los protocolos inalámbricos que se pueden configurar se encuentra el protocolo ZigBee a 2.4 GHz el cual permite transmitir pequeños paquetes de información con un gasto mínimo de energía y con un alcance de más de 700 metros según condiciones de visibilidad.

Sobre esta base se incorporan diversos sensores, que dan lugar a variantes de los nodos transmisores. Así por ejemplo, para dar lugar a un *nodo de Bluetooth* se añade al Waspmote V1.2, junto con el módulo de comunicaciones XBee Pro S2, un módulo de Bluetooth BlueGiga WT12. Con una configuración apropiada es posible trabajar con protocolos inalámbricos ZigBee y Bluetooth 2.1 +EDR a la vez y sin interferencia entre ellos. Para obtener un *nodo de ultrasonidos* se añade a la configuración inicial un sensor de ultrasonidos Maxbotix modelo XL-MaxSonar-WR1. Este opera con una frecuencia de 42KHz, y logra un alcance máximo de 600 cm con una sensibilidad de 3.2mV/cm a 3.3 V, o 700 cm y una sensibilidad de 4.9 mV/cm a 5.5 V.

El *nodo láser*, en cambio, se basa en una placa pico ITX con un nano procesador a 1.2 GHz, una memoria RAM DDR3 de 4 GB y un disco duro de estado sólido de 60 GB. El láser seleccionado es el modelo UTM-30LX-EW de la marca Hokuyo por tener características tipo IP67. La alimentación del láser se realiza mediante una batería de 12 Voltios cargada a través de un panel solar de 20 W.

Para la programación de los nodos transmisores (salvo en el caso del láser) se ha empleado la API desarrollada por Libelium. Dentro del conjunto de librerías suministradas por Libelium se han modificado las correspondientes al módulo de Bluetooth, añadiendo métodos nuevos para poder detectar y enviar por tramas todos los Bluetooth detectados en un periodo de cinco segundos. Para llevar a cabo la implementación del código se ha empleado la IDE desarrollada por Libelium. En el caso del nodo láser se ha tenido que desarrollar una solución independiente basada en Linux.

Todos los nodos transmisores se han encapsulado en cajas de protección de categoría IP 67, de manera que se pueda desplegar la red de sensores en el exterior y en cualquier tipo de condición atmosférica. Se han diseñado soportes acordes a las necesidades de espacio para fijar los componentes de los distintos nodos dentro de las cajas de protección IP 67.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Como se ha adelantado más arriba, se ha elegido el protocolo ZigBee para comunicar los nodos. La elección ha estado basada en varias razones. Por una parte, es un protocolo robusto y seguro, y el desarrollo es fácil. Por otra parte, tiene un bajo gasto energético. Esto implica una transferencia de datos baja, pero resulta suficiente para las necesidades de la red de sensores inalámbricos. Otra ventaja radica en la creación de la red por el nodo receptor y la unión a dicha red de los otros nodos transmisores o nuevos nodos que es muy sencilla e inmediata. Por último, es un protocolo muy extendido en diversos ámbitos, gracias a la ZigBee Alliance.

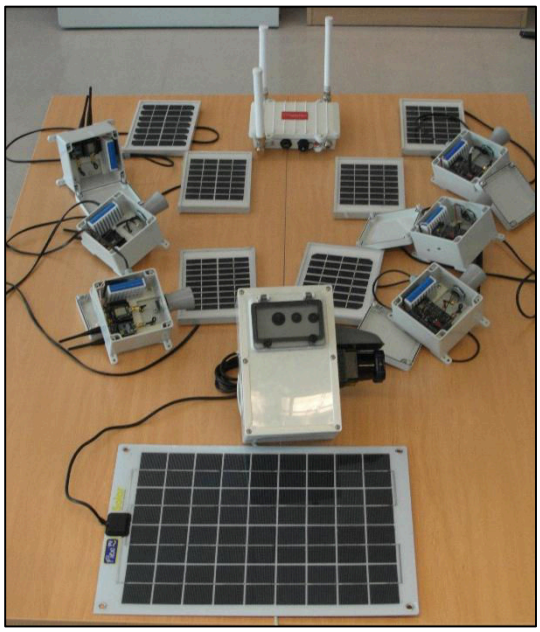


Figura 2: Conjunto de sensores y nodo coordinador.

En cuanto al despliegue de los nodos, las diversas elecciones de diseño permiten una gran flexibilidad. Los nodos transmisores de tipo Bluetooth se pueden posicionar en cualquier lugar siempre que estén dispuestos dentro del rango del nodo Receptor. Los nodos transmisores de tipo ultrasonidos deben colocarse con acceso libre al vial que vayan a controlar teniendo en cuenta que su alcance máximo de longitud es de 7 metros. Debe posicionarse a una altura de 50 centímetros con respecto al suelo. La campana del sensor debe estar en posición perpendicular al vial y sin obstáculos en su haz. El nodo transmisor de tipo láser debe ser montado a una altura que depende de la anchura de la calzada bajo estudio, pero que puede alcanzarse fácilmente con montajes sobre el mobiliario urbano (por ejemplo, sobre una farola). En cuanto al nodo receptor, al ser autónomo y no intrusivo se puede posicionar en cualquier localización, siempre que aporte la cobertura suficiente a todos los nodos dentro de su red.

3 CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO URBANO: MATRIZ DE ORIGEN-DESTINO

Una de las aplicaciones de este sistema es el cálculo de la matriz O-D en un ámbito concreto mediante la red de sensores inteligentes inalámbricos.

La matriz O-D es una expresión matemática que indica el número de vehículos que se desplazan entre un punto origen y otro punto destino. También puede ser expresada en número de personas equivalentes, según el estudio que quiera realizarse.

Tradicionalmente, han existido dos formas de obtener la matriz O-D: encuestas a conductores y monitorización del tráfico mediante sensores. En este trabajo, se desarrolla un método matemático para la obtención de la matriz O-D a partir de los datos recopilados por la red de sensores inteligentes inalámbricos.

Para la obtención de la matriz O-D se necesita información precisa acerca del número de vehículos que pasan por una determinada vía y del destino de los mismos. En términos matemáticos se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_{OD} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde m_{ij} representa el número de vehículos que pasando por el vial i (sección i) han tenido como destino el vial j (sección j) y n es el número total de secciones en estudio.

Siendo U_i la suma de vehículos que entran y salen por una sección i, se puede expresar como:

$$U_i = \sum_{j=1}^{n} m_{ij} + \sum_{j=1}^{n} m_{ji} = E_i + S_i \quad (2)$$

Siendo E_i y S_i el número total de vehículos que entran y salen, respectivamente de la sección i. Si llamamos β_{ij} a la proporción en tantos por uno de vehículos que teniendo como origen la sección i tiene como destino la sección j, cumpliéndose que:

$$\sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} = 1 \quad (3)$$

Se puede definir la matriz B como:

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & \beta_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La ecuación (2) puede escribirse como:

$$U_i = E_i + \sum_{j=1}^{n} \beta_{ji} \cdot E_j \quad (5)$$

Que también puede expresarse en forma matricial:

$$\vec{U}_i = \vec{E}_i + \vec{S}_i = I \cdot \vec{E}_i + B^T \cdot \vec{E}_i \quad (6)$$

Resultando un sistema de ecuaciones que, conocido el vector U_i y la matriz B, tiene como incógnita el vector E_i. Despejando en (6), resulta que:

$$\vec{U}_i = I \cdot \vec{E}_i + B^T \cdot \vec{E}_i = (I + B^T) \cdot \vec{E}_i$$
$$\vec{E}_i = (I + B^T)^{-1} \cdot \vec{U}_i \quad (7)$$

Ecuación que permite calcular E_i, siempre y cuando la matriz $(I+B^T)$ sea invertible.

Conocido E_i, la matriz O-D se obtiene como sigue:

$$M_{OD} = \begin{bmatrix} \beta_{11} \cdot E_1 & \beta_{12} \cdot E_1 & \cdots & \beta_{1n} \cdot E_1 \\ \beta_{21} \cdot E_2 & \beta_{22} \cdot E_2 & \ldots & \beta_{2n} \cdot E_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} \cdot E_n & \beta_{n2} \cdot E_n & \ldots & \beta_{nn} \cdot E_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para llegar a esta expresión se necesita conocer por un lado U_i y, por otro, la matriz B. Ambas se obtienen a partir de la información recopilada por el conjunto de sensores. Los sensores de tipo ultrasonido y láser contabilizan el total de vehículos que pasan por una sección de la vía, sin tener en cuenta si están entrando o saliendo de la misma. Por otro lado, la información recopilada por los sensores de Bluetooth, se analiza para obtener tendencias de origen-destino en los vehículos.

Cuando un nodo de Bluetooth localiza una MAC, éste envía una trama al nodo receptor, indicando la numeración del nodo, la MAC hallada y el tiempo, entre otros parámetros. La numeración del nodo está asociada a una sección de una vía en concreto. Con esta información se obtiene la sección de la vía por la que ha entrado el vehículo y la sección de la vía por la que ha salido, dando lugar a una aproximación de la matriz B. Hay que mencionar que la dirección MAC es única para cada dispositivo Bluetooth fabricado en el mundo.

Esta aproximación de la matriz B es similar a la realizada en los métodos tradicionales de cálculo de la matriz O-D mediante encuestas a los conductores. La confianza en los resultados depende de la muestra analizada con respecto al total de los vehículos que han circulado por las diferentes vías en estudio.

Las pruebas realizadas hasta el momento han tenido como objeto la calibración del sistema. Se han llevado a cabo pruebas en interior y pruebas en exterior. En los siguientes apartados se comentan los diferentes experimentos realizados.

4 APLICACIONES

En primer lugar, se realizaron pruebas en interior, en la biblioteca de la Escuela de Ingenierías de Málaga y los pasillos anexos. Consistió en el seguimiento de una dirección MAC durante su desplazamiento por una trayectoria dada y la contabilización de personas mediante ultrasonidos, identificándose correctamente la trayectoria realizada por el dispositivo con MAC conocida y detentándose el paso de personas por el sensor de ultrasonidos.

En segundo lugar, se han realizado pruebas en exterior.

Para poder obtener la matriz O-D según la expresión (8) se necesita conocer con buena aproximación la matriz B (4). Por tanto, es necesario conocer qué tanto por ciento de los vehículos que actualmente circulan por las carreteras españolas tienen dispositivos Bluetooth identificables por los sensores de nuestra red.

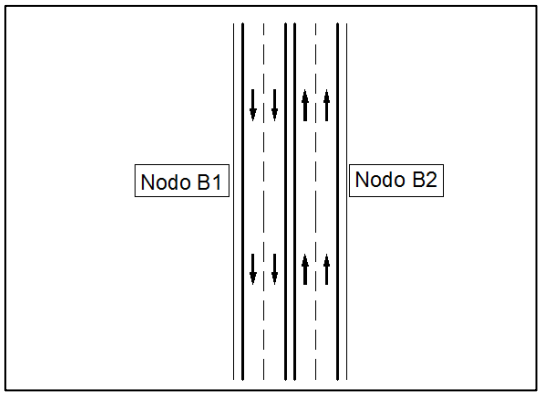


Figura 3: Esquema de instalación de sensores.

Para ello, se realizaron diferentes conteos en un tramo de la A-357, autovía de acceso a Málaga con un flujo de vehículos intenso y una velocidad máxima permitida de 100 km/h. Por un lado se contabilizaron el total de vehículos que circularon por ambos sentidos en un tiempo determinado y, por otro, se dispusieron dos nodos Bluetooth, uno en cada arcén, según se aprecia en la figura 3.

Los resultados obtenidos fueron que de 2.856 vehículos que circularon por el tramo, el sistema fue capaz de encontrar 198 MAC distintas, lo que supone un 6,9 % de dispositivos Bluetooth detectados. Resultados similares a los estudiados realizados en Indianápolis, EEUU (Brennan, 2010).

Para finalizar este apartado y cotejar los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en la autovía, se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

eligió una rotonda en un entorno urbano con tres ramales de entrada/salida de vehículos. El objetivo era probar el conjunto de sensores inalámbricos al completo.

La figura 4 muestra el esquema de la instalación realizada para la monitorización del cruce. La sección 1 se monitoriza con un nodo láser para contabilización de vehículos y un nodo Bluetooth para identificación de MAC, la sección 2 con dos nodos de ultrasonido y uno de Bluetooth y, por último, la sección 3 con un nodo de ultrasonido y otro de Bluetooth. Todos estos nodos sensoriales envían la información obtenida al nodo Coordinador en forma de tramas.

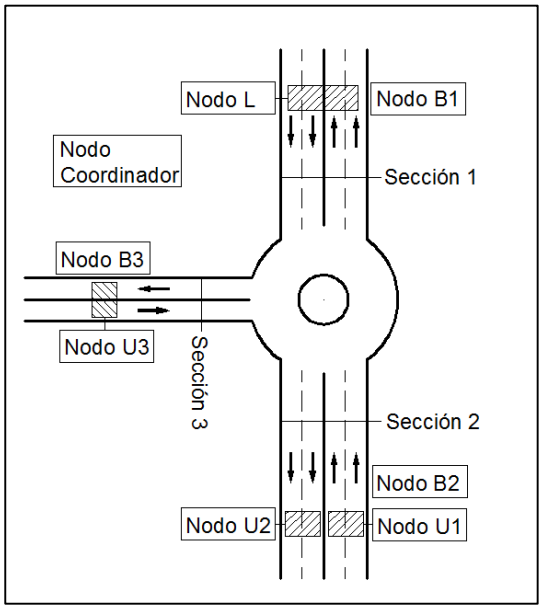


Figura 4: Esquema del cruce inteligente probado.

Durante el experimento se grabó en video el tráfico de la rotonda para el posterior análisis del número total de vehículos que han circulado por cada vial.

En las pruebas se comprobaron diferentes aspectos, tales como:

- La separación idónea entre los nodos Bluetooth para poder identificar por cual nodo ha entrado el vehículo y por cual ha salido.
- El funcionamiento del nodo láser como elemento totalizador del tráfico.
- El funcionamiento de los nodos de ultrasonido para el conteo del tráfico.
- Comprobar que el nodo coordinador recibe todas las tramas enviadas por los nodos sensoriales así como la cobertura con los mismos en diferentes situaciones.

Una vez terminadas las pruebas de campo, se procesó la información obtenida para cotejarla con el tráfico real medido. Se obtuvo la siguiente matriz B para un tiempo de 60 minutos y un total de 759 vehículos.

$$B = \begin{bmatrix} 0{,}03 & 0{,}60 & 0{,}37 \\ 0{,}95 & 0 & 0{,}05 \\ 0{,}71 & 0{,}29 & 0 \end{bmatrix}$$

Obtenida a partir de 52 direcciones MAC distintas con las que pudieron obtenerse un origen y un destino, las cuales corresponden a prácticamente el 7% del total de vehículos contabilizados en el experimento.

El siguiente paso es la planificación de nuevos experimentos de mayor duración y en diferentes horarios en un plazo de varios días y en diferentes zonas para poder elaborar un historial estadístico fiable con un fijo de vehículos mayor y, de este modo, realizar una comparativa con viales de distinta distribución para ver el comportamiento y la eficiencia de la red de sensores inteligentes inalámbricos.

Esta caracterización se incorporará al procesamiento de los datos dentro del SCADA que se está elaborando para la monitorización y la futura actuación del sistema y, así, aumentar la tolerancia a fallos de todo el sistema y, por tanto, su robustez.

5 CONCLUSIONES

El presente trabajo describe un sistema de información urbana basado en redes de sensores inalámbricos. Su carácter modular, tanto en la topología como en la batería de sensores que monta, permite obtener información acerca de las condiciones reales del tráfico en una determinada zona, y mejorar los modelos del mismo con vistas a adoptar estrategias de control que permitan optimizar el uso de las infraestructuras disponibles.

Se han llevado a cabo pruebas de validación del sistema en interiores y en exteriores. En el transcurso de las mismas ha podido comprobarse el correcto funcionamiento del sistema en líneas generales, y se han avanzado algunos parámetros del comportamiento del tráfico urbano en la zona de estudio, demostrando la viabilidad del sistema. No obstante, la caracterización de dicho comportamiento, y la estimación de su grado de exactitud, exige realizar ensayos de mayor duración, ya en fase de planificación, que permitan ampliar el número de vehículos detectados.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero de los fondos FEDER de la Unión Europea para el proyecto "Sistema Móvil de Información Aplicado a la Movilidad Urbana" (GI3000/IDIZ) dentro del "Programa Operativo FEDER 2007-2013". También queremos darle las gracias a todo el personal de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía por su dedicación y profesionalidad.

Referencias

[1] Akyildiz I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayrci (2002). Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks 38, 393-422.

[2] Arief B., P. Blythe, R. Fairchild, K. Selvarajah y A. Tully (2007). Integrating smartdust into intelligent transportation system. Technical report. University of Newcastle upon Tyne.

[3] Bera R., D. Mondal, S. Sil, S. Dhar, S. Sur, D. Bhaskar, S. K. Sarkar y D. Kandar (2009). 2009 International Conference on Computers and Devices for Communication.

[4] Brennan, T., Jr., Ernst, J. (2010). Influence of Vertical Sensor Placement on Data Collection Efficiency from Bluetooth MAC Address Collection Devices. Journal of Transportation Engineering, 136(12), 1104–1109.

[5] Chandrasekaran S., R. Haritha, S. Aiswarya, D. Dipesh (2010). A Fault Tolerant Pervasive Model for Intelligent Transport System. 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering.

[6] Dimitrakopoulos G. y P. Demestichas (2010). Intelligent Transportation Systems. IEEE Vehicular Technology Magazine.

[7] Joseph A. D. (2006). Intelligent Transportation Systems. IEEE Pervasive Computing.

[8] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. *http://www.libelium.com/.*

[9] Tacconi D., D. Miorandi, I. Carreras, F. Chiti, R. Fantacci (2010). Using wireless sensor networks to support intelligent transportation systems. Ad Hoc Networks 8, 462-473.

[10] Tubaishat M., P. Zhuang, Q. Qi, Y. Shang (2009). Wireless sensor networks in intelligent transportation systems. Wireless Communications and Mobile Computing, 9, 287-302.

[11] Xu N. (2002). A Survey of Sensor Network Applications. IEEE Communications Magazine.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

FLOTA DE VEHÍCULOS AÉREOS PARA FOTOGRAFIA DE ALTA RESOLUCIÓN EN APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISION. PROYECTO RHEA

Jaime del Cerro, David Sanz, João Valente, Claudio Rossi, Leandro Cancar, Antonio Barrientos,
Centro de Automática y Robótica CAR UPM-CSIC
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid
j.cerro@upm.es

Resumen

El proyecto RHEA se basa en la cooperación entre vehículos autónomos de tierra y aire con el objetivo de realizar ciertas tareas asociadas al ámbito de la agricultura de precisión. En concreto, la eliminación selectiva de malas hierbas a partir de su identificación basada en fotografía aérea de alta resolución y baja altura. El objetivo del presente trabajo es el de describir la flota de vehículos aéreos encargados de la adquisición de las imágenes, tanto desde el punto de vista de las unidades específicamente desarrolladas para este proyecto como de la aplicación software desarrollada para tal efecto.

Palabras Clave: Agricultura de precisión, Vehículos aéreos no tripulados, UAV, Aerial Coverage Path Planning, RHEA

1 INTRODUCCION

El proyecto europeo RHEA "Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management [3] ha sido desarrollado bajo el séptimo programa marco de la Comisión Europea identificado como NMP-CP-IP 245986-2 y su objetivo ha sido el diseño, desarrollo y validación de una nueva generación de sistemas robóticos para el tratamiento de malas hierbas en cultivos, aplicando tanto técnicas mecánicas como térmicas, junto a la utilización precisa de herbicidas.

El proyecto cubre gran variedad de cultivos típicos de la agricultura europea, que van desde cultivos como el tomate, maíz, fresas, girasoles y algodón de , con cultivo (wide crop) como cereales de invierno y cebada. En cuanto a árboles, el proyecto RHEA aborda tanto los de hoja perenne como nogales, almendros, olivos como los cultivos genéricos para la obtención de maderas y bosques.

El objetivo del proyecto RHEA es reducir en un 75% el uso de productos químicos, mejorando la calidad del cultivo así como la seguridad y salud para los seres humanos. Adicionalmente, esto supone una reducción en el coste de cosecha, directamente debido al ahorro de los consumibles. Para ello utiliza una flota de pequeños robots heterogéneos equipados con sistemas sensoriales avanzados y manipuladores o herramientas que ejecutan sobre el terreno las decisiones de avanzados algoritmos.

Como previamente se ha mencionado, la clave del proyecto está en la cooperación de vehículos de tierra y vehículos aéreos integrados en una flota para la gestión integral de los tratamientos. Así, el sistema demostrador se compone de dos vehículos aéreos y tres tractores de pequeñas dimensiones basados en plataformas comerciales a los que se le añaden elementos actuadores para tratamientos químicos, térmicos y mecánicos.

En concreto, en este trabajo se presenta la aportación de los vehículos aéreos, cuya misión es la de realizar fotografías aéreas de gran resolución y baja altura, que son utilizadas para realizar un mosaico geo-referenciado del terreno completo a tratar. A partir de esta imagen completa del terreno, un grupo de expertos en teledetección y agricultura de precisión detectan los rodales de malas hierbas, determinando con precisión su posición que es transmitida a un planificador específicamente desarrollado para la flota de vehículos terrestres que se encarga de determinar las misiones específicas para cada uno de ellos, con objeto de exterminar las malas hierbas sin dañar el cultivo.

Todo el proceso, desde la determinación del área de acción o cultivo a tratar, la parametrización de la misión y planificación aérea se realizan en el computador de la estación base. En dicho computador se puede realizar una simulación previa de la misión y monitorizar su ejecución real

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tras la validación. Dicho computador también se utiliza para la gestión de los vehículos terrestres, desde la planificación de misión, simulación y supervisión, tras ejecutar los algoritmos de detección de malas hierbas.

En la sección 2 se recoge una descripción de los vehículos aéreos utilizados. En la sección 3 se expone el procedimiento para definición y planificación de la misión aérea con varios vehículos. La sección 4 describe la estructura de control y monitorización de la flota. Finalmente, la sección 5 muestra los resultados alcanzados y analiza el cumplimiento de los requerimientos previamente establecidos por la tarea a desarrollar.

2 VEHICULOS AEREOS EN EL PROYECTO RHEA

Los vehículos aéreos que están encargados de realizar la misión de imagen aérea han sido específicamente desarrollados por la compañía alemana AirRobot [1], comercializados bajo la denominación AR200 (ver Figura 1).

Las unidades son vehículos multi-rotor, que con una capacidad de carga de 1,5 kg disponen de una autonomía de vuelo superior a los cuarenta minutos. Su estructura mide 2,2m de diámetro y tienen un peso de 4,5 kg. Disponen de un enlace de datos digital para la monitorización y control de la misión en tiempo real. Dado el tamaño elevado de las unidades para el transporte por parte de una persona, disponen de una configuración de transporte basada en un sistema de plegado de las patas tipo sombrilla, consiguiendo así que se requiera de un reducido espacio para su almacenamiento y transporte hasta el campo de vuelo y un rápido despliegue de las unidades, a las que tan solo hay que añadir las palas, mediante un ensamble rápido, e introducir la batería para estar totalmente operativas.

Uno de los factores críticos en el uso de los vehículos aéreos es la seguridad. En este sentido, el hecho de disponer de seis rotores de alta calidad confiere al sistema de un alto grado de confiabilidad. Adicionalmente proporciona redundancia a un sistema ya de por si muy estable, ya que el sistema es capaz de aterrizar sin problemas en caso de fallo de uno de sus motores lo que reduce enormemente el riesgo de accidente, que puede tener importantes repercusiones económicas, no solo por el coste del vehículo y de su carga, sino también por el riesgo de daño potencial a personas o terceros.

Figura 1. Unidades aéreas proyecto RHEA. AirRobot AR-200.

El sistema de percepción está compuesto por dos cámaras Sigma modelo Merril DP2 que capturan imágenes de 4800 x 3200 x 3 componentes, dotadas de ópticas de alta calidad y control totalmente manual. A una de las dos cámaras se le retira el filtro NIR (Near-Infra-Red). Las cámaras se instalan mediante un sistema de acople rápido en las unidades aéreas. El sistema se estabiliza por gravedad en dirección vertical al suelo (Figura 2), esto requiere que el vehículo aéreo esté totalmente estable en el momento de la captura de la imagen pero garantiza la verticalidad de la imagen aérea. El tiempo de grabación de la imagen en la tarjeta interna de la cámara es cercano a los seis segundos.

Figura 2. Sistema de detección remota de los vehículos aéreos.

Los vehículos disponen de capacidad de navegación definiendo una serie de puntos de paso (Way-Point navigation). En dichos puntos de paso el sistema de control de los vehículos puede realizar acciones sobre la carga de pago, como por ejemplo toma de medidas o disparo de una cámara. Por lo tanto, la parte principal del programa de vuelo simplemente consiste en generar una lista ordenada de puntos donde los vehículos tienen que tomar las fotografías, asegurándose un tiempo de parada en cada uno de ellos suficiente para la estabilización del sistema mecánico de anclaje de las cámaras y que el tiempo transcurrido entre dos puntos de paso es superior al tiempo requerido por la cámara para almacenar las imágenes en su tarjeta.

Si bien la operativa de los vehículos es totalmente autónoma en cuanto a la navegación a través de los puntos de paso, por motivos de seguridad y de acuerdo a las legislaciones emergentes relacionadas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

con la operación de vehículos aéreos no tripulados, el sistema requiere de un operador que supervisa la misión. Así, el despegue y aterrizaje se realizan mediante ordenes que proporciona el operador de cada una de ellas utilizando un equipo de comunicaciones y el mando remoto denominado BKS mostrado en la Figura 3. Este modo de control semiautónomo incrementa la seguridad en dichas maniobras, especialmente en el aterrizaje, ya que el vehículo no dispone de sensores de proximidad y la distancia libre al suelo, con las cámaras instaladas, es muy reducida, lo que supondría que cualquier error en el posicionamiento GPS podría causar aterrizar sobre alguna pequeña piedra o montículo de tierra que podría dañar el sistema de visión.

La única situación en la que se permite el aterrizaje autónomo de las unidades es cuando se activa un estado de emergencia debido a que la batería ha alcanzado un nivel crítico o bien el vehículo ha traspasado, por algún motivo, las fronteras de seguridad impuestas por el operador.

Figura 3. BKS para el control y supervisión por parte del operador del vehículo aéreo.

Tras la finalización de la misión, las imágenes capturadas son traspasadas al computador de la estación base, utilizando las tarjetas de memoria internas de las cámaras.

3 DEFINICIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA MISIÓN AEREA

Se describe a continuación el proceso de definición de la misión a ser desarrollada por los vehículos aéreos.

Como primer paso, el operador debe indicar el contorno del campo de interés mediante el uso de la interfaz gráfica en la estación base. Para ello puede definir una polilínea de un número cualquiera de segmentos definiendo así un polígono con cualquier forma. Cada vértice de la polilínea se define por tres coordenadas UTM (Universal Trasnversal Mercator Coordinates). Adicionalmente, el operador debe definir dos tipos de contornos de seguridad. El primero activará una alarma cuando el vehículo traspasase dicho contorno, avisando al operador de tal circunstancia, el segundo conllevaría otra alarma y una maniobra de aterrizaje preventivo como medida de seguridad. La definición de dichos contornos se ve afectada por áreas sobre las cuales no se debe volar bajo ninguna circunstancia, como por ejemplo carreteras o edificios.

El sistema permite definir el número de unidades aéreas disponibles para la realización de la misión, que si bien el número disponible en el proyecto es dos, los algoritmos desarrollados son genéricos admitiendo cualquier otro valor. La utilización de varios vehículos de forma simultánea permite reducir la variación en los niveles de iluminación producidos por tiempos prolongados de misión cuando los terrenos son muy grandes. Obviamente no presenta ninguna ventaja cuando los campos de cultivo son de reducido tamaño. Teniendo en cuenta el tiempo de vuelo máximo de las unidades aéreas utilizadas, de 40 minutos, el uso de dos unidades permitiría cubrir campos de grandes extensiones con un solo vuelo simultáneo.

Para el reparto de áreas entre ambos vehículos se han desarrollado varios algoritmos, que permiten distribuir la tarea de forma no homogénea (un vehículo podría tener un nivel de batería diferente del otro por ejemplo). No obstante los condicionantes de seguridad en la misión han conducido a una solución básica pero efectiva que será detallada más adelante en esta misma sección.

La mayoría de los requerimientos se establecen a partir de la resolución espacial requerida para el reconocimiento de las malas hierbas. Durante las pruebas este valor se ha establecido en 1 o 2 pixeles por centímetro. Este valor unido al valor de la distancia focal de las cámaras (30mm) y tamaño de los sensores (23.5x15.7 mm) determina que cada imagen tiene un tamaño real sobre el suelo de 48x32 metros, lo que obliga a unas alturas de vuelo cercanos a los 60 metros, obtenidas mediante la aplicación de la siguiente relación:

$$Height = FocalLength\left(\frac{RealSize}{SensorSize}\right) \quad (1)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Adicionalmente se debe establecer un porcentaje de solape (overlapping) entre las fotografías, con objeto de minorar el efecto de los errores en el posicionamiento GPS de los vehículos (usan un sistema de posicionamiento GPS simple no diferencial por reducción de peso), de los errores en el control (la posición real no es exactamente la deseada) y de las pequeñas divergencias en los ángulos de guiñada y alabeo de las cámaras (no perfectamente verticales). Adicionalmente, puesto que la técnica de mosaico desarrollada en el proyecto permite la reconstrucción tridimensional del terreno, es necesario que todos los puntos del terreno aparezcan en dos fotografías anexas, requiriéndose por todo ello un elevado porcentaje de solapamiento, trabajándose con un valor del 60%. Este valor reduce la distancia entre puntos centrales de las imágenes a 19 metros aproximadamente para obtener resoluciones de 1 pixel/cm.

Considerando estos parámetros, la discretización del campo de cultivo se realiza mediante la implantación de una matriz de puntos separados 19 metros. La orientación de esta matriz se estudia detalladamente en [7]. Un algoritmo computa los puntos de la matriz en los que es necesario tomar una fotografía y en cuales no, en función de la forma del campo (algunos de ellos deberán estar fuera del campo para obtener el solapamiento requerido) tal y como ilustra la Figura 4. Dicha figura muestra un ejemplo de un campo definido por cinco vértices sobre el que se aplica una discretización y selección de puntos donde es necesario adquirir imágenes y donde no.

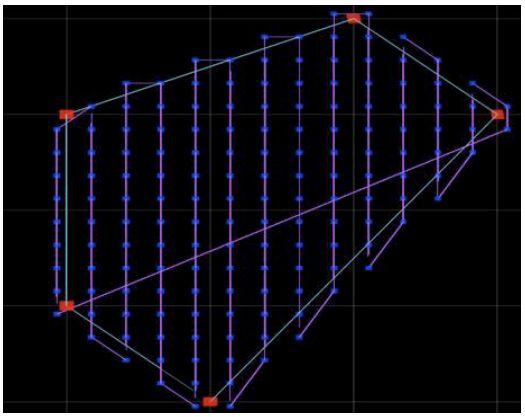


Figura 4. Ejemplo de discretización de campo de cultivo genérico.

Al igual que en el caso de repartición de áreas entre los vehículos, el algoritmo que finalmente se ha utilizado para definir las trayectorias que unen los puntos de paso se ha elegido teniendo en consideración de la seguridad de la misión. Por ello, los vehículos solo realizan movimientos simples de avance y retroceso a lo largo de las filas o columnas de la matriz (cubriendo únicamente los puntos de paso necesarios). Estas trayectorias son simples de intuir por los operadores que supervisan el sistema, detectando rápidamente cualquier anomalía. La elección de este algoritmo permite el reparto de zonas simplemente dividiendo la trayectoria total entre el número de vehículos, considerando únicamente filas o columnas completas. De esta forma, se garantiza que nunca dos vehículos se encuentran en la misma fila o columna, permaneciendo distanciados de una forma uniforme a lo largo de la misión, comenzando siempre desde el punto mas cercano al de despegue. La forma del campo influye también en determinar si se realizan las misiones describiendo filas o columnas, eligiendo la opción que maximiza la distancia entre los vehículos, que habitualmente coincide con la dimensión inferior de la matriz.

El algoritmo planificador ha sido codificado usando C++ permitiendo compilación multiplataforma. En el proyecto se ha utilizado una versión bajo Windows 7, coincidiendo con todas las aplicaciones alojadas en el computador de la estación base.

4 EJECUCION DE LA MISION Y MONITORIZACION

La estructura y secuencia de gestión de las misiones aéreas se muestran en la Figura 5, que adicionalmente incluye los módulos software principales o bloques que están involucrados en el proceso. Esta sección está dedicada a la descripción de dichos módulos desde un punto de vista funcional.

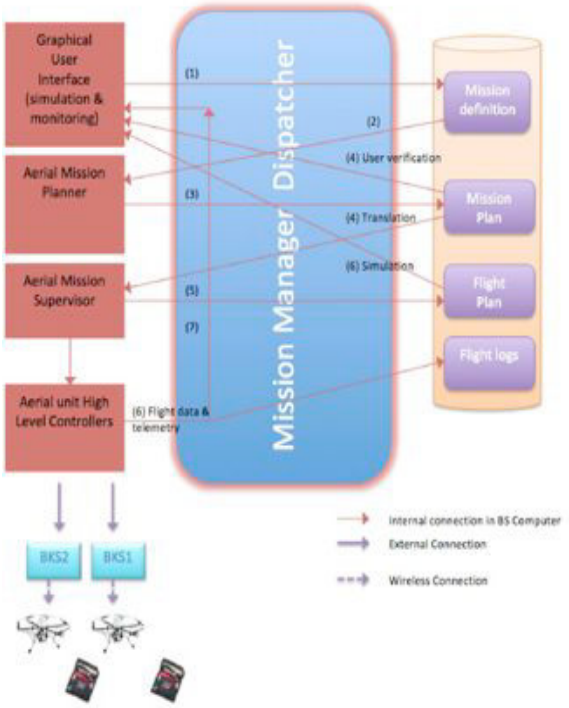


Figura 5. Secuencia de la Misión Aérea.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

El primer bloque involucrado es la interfaz gráfica de usuario o GUI (Graphical User Interface). Este módulo ha sido desarrollado por Cyberbotics Ltd, usando el simulador robótico Webots7 [2]. Esta aplicación no solo tiene funcionalidades clásicas como definición de misión o monitorización de telemetría y alarmas, sino que permite la simulación de los vehículos aéreos y terrestres de forma previa a la ejecución de sus misiones, con objeto de validar las planificaciones. Los parámetros de los vehículos y del sistema de percepción (parámetros de cámaras, etc.,) así como la definición de la misión (definición de campos de cultivo y áreas de seguridad) se almacenan en la base de datos del sistema permitiendo así utilizar diferentes configuraciones de una forma ágil o repetir anteriores inspecciones.

Una vez que la misión ha sido definida, el usuario puede ejecutar la planificación aérea para obtener las trayectorias para la flota de acuerdo a las especificaciones detalladas en la sección 3 de este trabajo. En este paso, un fichero que contiene el plan de misión es creado. Dicho plan contiene las trayectorias para el número de drones elegidos por el usuario. Estas trayectorias son presentadas por el módulo GUI para validación mediante impresión sobre la imagen aérea del terreno de las zonas correspondientes a las fotografías a realizar y comprobando que parámetros, como el solapamiento, son correctos.

El plan de misión que tiene un formato genérico (lista de puntos de paso) para cualquier tipo de vehículo aéreo. Por lo tanto, el segundo paso es la generación de los planes de vuelo en función de los protocolos de los vehículos a utilizar. En el proyecto RHEA correspondiente a los formatos y expresiones del protocolo establecido por AirRobot. Tras esta fase de codificación, se crean los planes de vuelo que bien pueden ser simulados utilizando el modulo GUI (ver Figura 6) o directamente transmitidos al supervisor de misión para su ejecución sobre los drones reales.

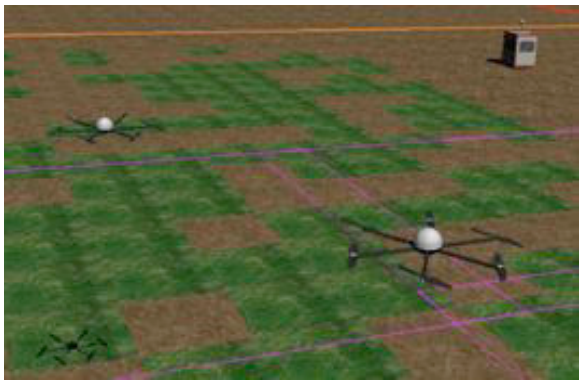


Figura 6. Vista de la simulación de la misión aérea.

4.2 SUPERVISOR DE MISION AEREA

Si el operador de la estación base considera que los resultados obtenidos en la simulación son adecuados, el supervisor se encarga de descargar los planes de vuelo a los vehículos, a través del módulo de control de alto nivel AUHLC (Aerial Unit Hight Level Control) que a su vez los comunica a los vehículos mediante conexiones USB con los módulos BKS. Las comunicaciones entre los módulos de la estación de tierra como el supervisor de misión o el AUHLC se realizan mediante sockets utilizando un modulo gestor y coordinador de todas las comunicaciones.

El supervisor aéreo es el módulo encargado de vigilar el estado de los vehículos y de la misión, gestionando las alarmas que pudiesen producirse en los vehículos o en el desarrollo de la misión y presentándolos al operador de la flota a través de la GUI. Este módulo es el encargado de la detección de problemas tales como un excesivo retraso en la ejecución de la misión, un tiempo excesivo en alcanzar un punto de paso o el control de los niveles de baterías, etc.,

Adicionalmente, el módulo supervisor es el encargado de comunicar los comandos de control de misión recibidos a través de la GUI, gestionando los comandos enviados a los vehículos de una forma adecuada, como por ejemplo pausar una misión (manteniendo los vehículos en vuelo estacionario en la posición en la que se encontraban en el momento de la orden), continuarla desde el punto en que se encuentren, reiniciarla o cancelarla, lo que supone que los vehículos regresan autónomamente a la vertical del punto de despegue

Como se ha mencionado anteriormente, el despegue y aterrizaje se realiza mediante ordenes del operador del vehículo. Así, tras enviar las misiones a los vehículos, el operador debe dar la orden de despegue a los drones, mediante comandos de velocidad vertical, controlando su posición con comandos de velocidad frontal y lateral. Una vez alcanzada la altura indicada en el protocolo de actuación, el operador de misión desde la estación base puede dar la orden de comienzo de misión que es transmitida a las unidades para el comienzo de la ejecución de sus respectivos planes de vuelo. Los operadores de los vehículos pueden en cualquier momento tomar el control de una forma preferente ante el plan de vuelo establecido, interrumpiendo así la misión.

4.3 CONTROL DE ALTO NIVEL

Como se ha mencionado anteriormente, los drones implementan un control de bajo nivel que permite la navegación definida por puntos de paso, lo que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

supone un control de actitud y velocidad implementados sobre el sistema de control embarcado.

Por encima de este nivel de control, y alojado en el computador de la estación de tierra se encuentra un módulo por cada unidad aérea denominado sistema de control de alto nivel, implementado en C++ bajo el sistema operativo del computador, en este caso Windows 7. Un proceso gestiona la comunicación con cada unidad aérea de una forma independiente. Este módulo está encargado entre otras cosas de las conversiones de formato en las posiciones, ya que el proyecto RHEA utiliza formato UTM y los drones de AirRobot el formato terrestre (longitud-latitud). No obstante, su misión principal es la traducción de las comunicaciones de las unidades aéreas bajo protocolo propietario de su diseñador a un lenguaje genérico. Esta característica permitiría integrar vehículos aéreos diferentes, considerándose este módulo como middleware o capa intermedia. Esta capa de abstracción incluye también el nivel físico, así los vehículos utilizados en el proyecto RHEA se comunican mediante conexiones USB a través de sus módulos BKS, que adicionalmente permiten la recepción de señal de video que puede ser incorporada a la estación de tierra mediante una simple capturadora y que permitiría de esa forma al operador de misión ver lo que está sobrevolando cada unidad en cada momento.

4.3 GESTOR DE COMUNICACIONES Y MISION

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 5 todas las comunicaciones dentro del sistema RHEA son gestionados por éste módulo (Mission Manager Dispatcher). Implementado como una macro-maquina de estados, es el encargado de supervisar el desarrollo de la misión.

5 RESULTADOS

Un proyecto como el RHEA ha requerido numerosas y variadas integraciones. Desde la inicial, que tenía como objetivo únicamente aspectos físicos (tamaños, pesos, alimentaciones, conectores) a nivel subsistema (vehículo o estación base), como las finales, que integraban la completa funcionalidad del proyecto.

Otro aspecto que a considerar es que las integraciones y pruebas debían sincronizarse temporalmente con los cultivos, por lo que fue necesario realizar pruebas con cereales de invierno (que tuvo lugar en el mes de Enero de 2014) y otra posterior en Mayo de 2014. No obstante, desde el punto de vista de misión aérea, no había diferencia alguna. Todas las pruebas se realizaron en terrenos gestionados agrariamente por el ICA (Instituto de Técnicas Agrarias del CSIC) en Arganda del Rey (Madrid).

A continuación se muestran los planes de vuelo sobre los campos de cultivo mediante la utilización de dos vehículos AR-200 y algunas imágenes ilustrativas tomadas durante las pruebas. En la Figura 7, en el campo de la parte superior correspondiente a las pruebas de Mayo, solo se pueden mostrar los planes de vuelo, ya que las nuevas políticas vigentes en España desde el primer semestre del 2014, impidieron la obtención del correspondiente permiso de la agencia Española para la seguridad aérea AESA para realizar los vuelos. En la parte inferior, se representa en color blanco la posición de los drones y en colores amarillo y verde la planificación realizada para las pruebas con cereal de invierno, demostración de Enero de 2014.

Figura 7. Planes de vuelo y trayectorias reales seguidas por las unidades en las demostraciones del proyecto RHEA

Figura 8. Vehículos aéreos antes de comienzo de la misión. Se pueden observar también dos tractores de la flota y la estación de tierra.

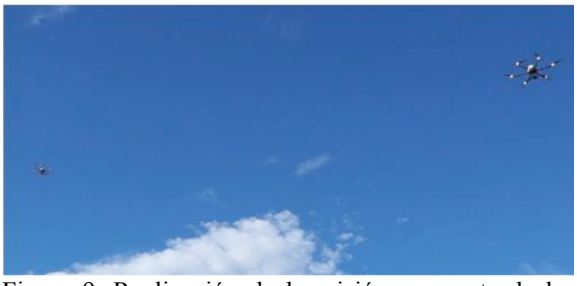


Figura 9. Realización de la misión por parte de los vehículos aéreos.

Un video completo de la demostración está accesible en el sitio web del proyecto RHEA (4).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

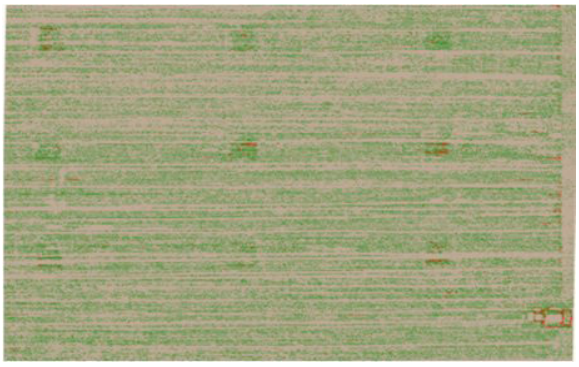


Figura 10. Resultado mosaico para detección de rodales de mala hierba.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por el grupo de Robótica y Cibernética del Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC a través de su participación en el proyecto Robot Fleets for Highly Efective Agriculture and Forestry Management", (RHEA) financiado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea (NMPCP-IP 245986-2 RHEA). Los autores agradecen a todos los socios del proyecto su colaboración. Asimismo han contribuido a su desarrollo el proyecto ROBOCITY2030, financiado por la Comunidad de Madrid (S-0505/DPI/000235) y el proyecto ROTOS del plan nacional, a través del ministerio de Ministerio de Economía y Competitividad (DPI 2010-17998).

Referencias

[1] AIR ROBOT Website, http://www.airrobot.de

[2] Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J., Martinez, A., Rossi, C., Sanz, D., Valente, J, (2011) "Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots", Journal of Field Robotics 28(5), pp 667–689

[3] Cyberbotics Website, http:// www.cyberbotics.com

[4] RHEA project Website, http://www.rhea-project.eu

[5] Valente, J., Barrientos, A., Del Cerro, J., (2013) "Optimization of Aerial Surveys using an Algorithm Inspired in Musicians Improvisation." In: 23rd International Conference on Automated Planning and Scheduling, Rome

[6] Valente, J., Sanz, D., Del Cerro, J., Barrientos, A., De Frutos, M.A., (2013) "Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using a mini quad-rotor over irregularshaped fields. Precision Agriculture 14(1), pp. 115–132

[7] Valente J, Del Cerro, J., Barrientos, A., (2013) "What is the optimal stitching orientation from an aerial survey perspective?", Second International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry, pp. 449-457

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

LOCALITY-SENSITIVE HASHING FOR LARGE SCALE IMAGE RETRIEVAL

Adrián Sánchez Álvarez
asanca00@estudiantes.unileon.es

Enrique Alegre
enrique.alegre@unileon.es

Víctor González Castro
victor.gonzalez@emse.fr

Diego García Ordás
dgaro@unileon.es

Abstract

In this article we give an overview of the Locality-sensitive Hashing (LSH) used for large scale image retrieval and to solve the nearest neighbor problem. The goal is to experiment with different parameters configurations of LSH over a set of video fingerprints to see which is the best in terms of precision and indexing so that later, given a query object, return the objects (nearest neighbors) that are most similar to the query. The configuration parameters that offered best results were a bucket size of 24 with 15 tables and hash sizes of 15 bits, obtaining about 50% of correct matches with P@4 and P@6 retrieval methods.

Key Words: High Scale Image Retrieval, Indexing Algorithms, Locality-sensitive Hashing, LSH, Nearest Neighbor.

1 INTRODUCTION

Nowadays, the use of image processing is hugely increasing in many domains such as web clustering [11], computational biology [7] [6], computer vision [11], computational drug design [9], computational linguistics [14], etc. because computer vision is very helpful in many issues. One of the problems that can be solved by means of image processing, which is also an active research field, is image retrieval (i.e. finding a specific object in a large collection of images).

Image retrieval methods are present in many applications, such as finding DVD covers, book covers, buildings, faces, etc. Other examples are systems like Google Street View or Bing Street Side, which are available for users and make extensive use of large-scale image databases. The user can query the system using a captured image or textual description to find similar images in the databases.

Image retrieval is a challenging task because, most times, the databases the search algorithms are working with hundreds of millions or billions of images and, given a query image, the system must retrieve matching images in the database as quickly and accurately as possible. Thus, the key in this case is carrying out a good indexing process of the images in the database. In this article the indexing and retrieval processes are based on nearest neighbor problem that will be explained later, but a basic definition is: given a collection of n points, we build a data structure that, given a query point, it returns the data points that are closer to the query point.

There are many multidimensional data structures [15], but we distinguish two principal kinds of indexing methods: Bag of Words methods and Full Representation Methods. In Bag of Words methods, the features of the image are extracted, quantified and converted into histograms of visual words. Afterwards, these histograms are stored in a data structure, such as *Inverted File* or *Min-Hash* tables, to search the query image with the most similar histogram, i.e. using the nearest-neighbor method. The reader interested in further details is addressed to [3].

The Full Representation Methods include *Kd-Trees* and *Locality-Sensitive Hashing*. Kd-Trees were introduced in 1975 by Jon Bentley [5]. In this data structure, one (or more) randomized Kd-trees are built for the database features to allow for approximate nearest-neighbor matching in logarithmic time. There are two parameters that affect Kd-Trees recognition performance, storage, and run time: (i) The number of trees and (ii) the number of backtracking steps. Increasing the former increases the accuracy with no high impact on the speed, but increasing however, the required storage. According to the latter, it poses a tradeoff between accuracy and speed: More steps will yield more accuracy but also make the query slower.

On the other hand, the Locality Sensitive Hashing (LSH) algorithm depends on the existence of a number of hash functions extracted from the feature database [2]. The key idea is to hash the features to ensure that all features with the same hash value should go to the same bucket, so a bucket should have closest objects. This article is focused on LSH method because it is better than their counterparts in terms of search time. It is one of the most popular algorithms for performing approximate search in high dimensionality.

In this paper a study of the Locally Sensitive Hashing (LSH) algorithm applied to video descriptors is presented. In Section 2, we introduce the LSH method and the nearest neighbor. This section also contains an overview of the LSH method and its algorithm. In Section 3, we explain in detail the performed experiment. The Section 4 contains an explication of the

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

experiment's results. Finally in section 5, we present the conclusions we have reached.

2 LOCALITY-SENSITIVE HASHING APPROACH

2.1 INTRODUCTION TO LSH

The LSH technique was introduced by Indyck and Motwani [12] with the purpose of creating algorithms to solve the ε-Nearest Neighbor Search. The LSH method and its variants have been applied to computational problems in some areas like web clustering or computer vision [11].

The principal goal of the algorithm [1] is to index a collection of n points using hash functions that ensure that the collision (i.e. similarity between objects) is higher to objects that are close between each other than for points that are far away. Then, the nearest neighbors can be determined hashing the query point and returning the elements of the bucket which would contain that point.

2.1.1 The Nearest Neighbor Problem

The nearest neighbor problem is an optimization problem: the goal is to find a point that minimizes a certain objective function [1]. There are several approaches to the problem: *nearest-neighbor*, *R-near neighbor* y *c-approximate r-near neighbor* with their *randomized* variations.

Let the nearest neighbor of a given point 'q' be the nearest point to 'q'. The R-near neighbor refers to the points which are within a circle of range *R* centered on *q*, i.e., a R-near neighbor returns points *p* such that | (| *p* - *q* |) | ≤ *R*. A c-approximate R-near neighbor returns a point p such that | (| *p* - *q* |) | ≤ *cR*, see Figure 1 to a better understanding. Randomized means that a point p is returned with a 90% probability of being the nearest.

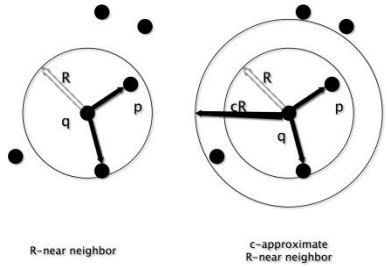


Figure 1: Example of the difference between R-near neighbor and its c-approximate variation

2.2 LSH

The LSH algorithm depends on the existence of a number of hash functions extracted from the feature database. Let *H* be a family of hash functions mapping $\mathbb{R}^{\boldsymbol{d}}$ for any universe *U*. Given two points, *p* and *q*, it is considered a process in which a function *h* is chosen from *H* uniformly and randomly, and the probability that *h* (*p*) = *h* (*q*) is analyzed. The family *H* is called locally sensitive if the following condition is satisfied:

***Definition (Locality-sensitive hashing)*:** A family *H* is called (R, cR, P_1, P_2)-sensitive if for any two points *q*, *p* ∈ $\mathbb{R}^{\boldsymbol{d}}$:

- If $\left|\left|p-q\right|\right| \leq R$ then $Pr_H[h(q) = h(p)] \geq P_1$, (1)
- If $\left|\left|p-q\right|\right| \geq cR$ then $Pr_H[h(q) = h(p)] \leq P_2$

Meaning; 1) c: c-approximate, 2) R: the range of search. 3) P_1, P_2, Pr_H are probabilities. The reader can see Figure 2 to see an illustration of the ranges cited in 1) and 2). In order to have a useful locality-sensitive hash family, it has to satisfy: $P_1 > P_2$ and $R > cR$.

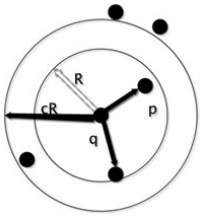


Figure 2: Locality-sensitive family

For a random hash function $h(\,)$ in $\mathbb{R}^{\boldsymbol{d}}$, for any points *p*, *q*: the probability P_1 is the probability that the distance between *p* and *q* is lower or equal than *R* (the points are near) and P_1 is high and the probability P_2 is the probability that the distance between *p* and *q* is higher or equal than R (the points are far) and P_2 is low.

2.3 THE ALGORITHM

A LSH hash functions family *H* can be used to elaborate an algorithm to solve the approximate search of the nearest-neighbor. The algorithm is formed by two stages: The pre-processing step and the query algorithm. This is detailed in Figure 3.

In the pre-processing step the data structure is built from the input dataset. *L* hash functions are extracted [2] $h_j, j = 1,2,3 \ldots L$ and a different hash table is created per function. The j^{th} table (with $j = 1,2,3 \ldots L$) contains the characteristics of the data set hashed using the function h_j to get the index of the bucket where the feature should go. Within each hash table *j*, all features with the same hash value should go to the same bucket.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

There are two parameters for any LSH [2] method: *L* and *T*. *L* is the total number of hash functions used, if there are many functions the runtime is increased but there are more probabilities of finding similar elements and, therefore, the bucket size is smaller. The parameter *T* is the number of hash tables used. A large number of tables increase the performance at the expense of increasing the runtime.

Using multiple hash tables allows us to improve the performance in terms of search, i.e., finding all possible nearest neighbors that would have not been found using a single table.

Table 1: Example of using multiple tables.

	Hash Tables' Buckets				
Hash table 1		P_1	P_2P_3	P_4	
Hash table 2	P_1		P_2P_3 P_4		
Hash table 3	P_1P_3		P_4		P_2

For Example, illustrated in Table 1, if only Hash table 1 was used, the nearest neighbor to P_3 would be only P_2, whereas if we use all the tables we find that the points P_1P_2 and $P_4$are also near P_3.

In the query step of the algorithm, the point q is searched in the database through the buckets $h_j(q), \dots, h_L(q)$ and the points stored in them are returned. For the sake of clarity: for hash table 1 (whose hash function is $h_1()$), it operates the hash function with the query point $h_1(q)$ to find out to which bucket of the hash table would go the query point. The stored items in that bucket, which would be the closest to q, are returned.

To determine the *R* nearest points or the nearest point we can measure the distance between the returned points and the query point q, by means of the Hamming distance as follows (see [10] to view in depth):

If the set of points returned is *P*, we assign to *C* the farthest coordinate to all points in *P*. We can introduce *P* in the Hamming cube with $d' = Cd$, transforming each point $p = (x_1 \dots x_d)$ in a binary vector

$$v(p) = Unary_C(x_1) \dots Unary_C(x_d) \qquad (2)$$

Where $Unary_C(x)$ denotes the unary representation of *x*, i.e., is a sequence of *x* ones followed by $C - x$ zeros. Now, for any two points *p* and *q* with coordinates in the set $\{1 \dots C\}$, the distance between them is given by the Hamming distance

$$d_1(p, q) = d_H(v(p), v(q)) \qquad (3)$$

With this, we can focus on solving the nearest neighbor problem in Hamming Space $H^{d'}$.

Preprocesing:

1. Choose *L* functions $g_j, j = 1, \dots L$ by setting $g_j = (h_{1,j}, h_{2,j}, \dots h_{k,j})$, whrere $h_{1,j}, \dots h_{k,j}$ are chosen at random from the LSH family *H*.
2. Construct L hash tables, where for each $j = 1, \dots L$ the j^{th} hash table contains the dataset points hashed using the function g_j.

Query algorithm for a query point *q*:

1. For each $j = 1, \dots L$
   - I. Retrieve the points from the bucket $g_j(q)$in the j^{th} hash table.
   - II. For each of the retrieved point, compute the distance from q to it, and report the point if it is a correct answer (near neighbor).
   - III. (optional) Stop as soon as the number of reported points is more than L'.

Figure 3: LSH algorithm

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3 EXPERIMENT

The goal of the experiment that we have carried out is to compare different configurations of LSH parameters to assess which is the best one. We used 4 different configurations of LSH: configuration 1, 2, 3 and 4 having buckets sizes 6, 12, 18 and 24 respectively. Then, each configuration is divided into six different combinations of numbers of tables and number of bits of the Hash Key. A configuration example is showed in Table 2, the number of tables and the numbers of bits of the hash key are the same for the others configurations, only changes the bucket size.

Table 2: Example of configuration.

Bucket Size	# Tables	# Bits of HashKey	Configuration
6	10	20	Configuration 1.1
6	15	20	Configuration 1.2
6	20	20	Configuration 1.3
6	15	10	Configuration 1.4
6	15	15	Configuration 1.5
6	15	25	Configuration 1.6

The LSH code used in the experiment was developed by Alex Andoni in 2004-2005 and can be found in [4]. This code is written in MATLAB and contains a simple implementation of Locality-Sensitive Hashing algorithm by Indyck. This code has two types of LSH: LSH and e2LSH.

The LSH type contains the older algorithm described in Gionis paper [10]. In this algorithm, for each hash function a single dimension of the data is chosen uniformly at random, and a single threshold value is drawn uniformly over the data range in that dimension.

The e2LSH is a more recent algorithm described in [8]. In this algorithm, for each hash function, a random line with independent, normally distributed coefficients is generated, and the data are projected to the line and shifted. Then, the range is divided into “cells” of a specific width; the hash value is determined by the cell into which a projected and shifted value falls.

We chose to work with the basic implementation of LSH: LSH type. The code needs to keep around the original data, in order to go back from indices to actual points because LSH will only index the data. There are three basic parameters to play with: the bucket’s size, the number of tables and the number of bits of the hash functions.

The final descriptors are a set of 1170 fingerprints
The extraction process of the fingerprints using SaKe has the following steps:

1. FPS Reduction: First of all, the size of the video (temporal, not spatial) is reduced by reducing the frames per second. That is because in a video, two consecutive frames are often very similar and provide redundant information.
2. Resizing and conversion to luminance: After reducing the fps in the previous step, the video is resized to a fixed size and converted to YCbCr color space. In this color space, we keep with the channel 'Y', which contains the luminance. This fixed size luminance video will be used in the next step.
3. Keyframe Detection: In this case, we define as keyframe a frame in which it takes place a significant change in luminance with respect to its contiguous frame. The keyframes calculated in this way are indicators of possible candidates to scene changes in a video.
4. HESRIs Generation: A HESRI is an image generated from the temporal and spatial information of a video block. Each keyframe obtained in the previous step determines the start of a new HESRI. Thus, a HERSI is a condensation of a video block in a picture.
5. Fingerprint Extraction: This step divides each video HESRI in p overlapped square pieces. On each piece we calculate a Discrete Cosine Transform (DCT) and we keep the first vertical and first horizontal coefficients of each DCT. This form we obtain $2p$ coefficients of each HESRI. The fingerprint is generated by concatenating in a vector all these coefficients along of all HESRIs of the Video.
6. Fingerprint Binarization: Finally, the vector of coefficients is transformed into a binary string (final fingerprint) by calculating the median of the vector and by setting to 1 the elements higher or equal to the median and the rest of elements to 0.

We have carried out two experiments to test the accuracy and the precision of the indexing method. The first one is a self-test code. In it, a number of descriptors and 2 neighbors to each one can be selected.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

The second test is a test of matching based on precision recall; see [13] for more information about these metric. Precision is the probability that a returned document (selected randomly) is relevant (% of elements selected that are correct). Recall is the probability that a relevant document (selected randomly) is returned in a search (% correct elements that are selected). We use Precision at n (P@n) to obtain the precision percentage. Precision at n is the precision evaluated given a list of ranges; the top-n documents are the first in the range. Therefore, precision at n is the proportion of the top-n documents that are relevant.

$$Precision\ at\ n = \frac{r}{n} \qquad (5)$$

r relevant documents have been returned of the range of n relevant documents. In our descriptors, there are six relevant documents, the descriptor and its five transformations.

In summary, the second test consists of extracting ten descriptors randomly and asking for six neighbors of every each. Then the test checks if the returned neighbors are similar or not and calculate the P@1, P@2, P@4 and P@6.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

We have run the code with the different configuration parameters ten times and observed the average of these executions to avoid possible random effects on the results**,** so, the results we show here are an average of all the executions we did.

With respect to the runtime average, we have only checked the runtime for the P@n executions, and we always obtain a despicable runtime under 0,0186508s. So, we think the time here is not an important factor.

Then, regarding the results, on one hand the self-test code yields an idea of the occupancy of the buckets. Its results are presented in Figure 4. As it is shown, the buckets occupancy is related to the number of bits of the hash key. For a low number of bits, the buckets tend to be full, but as we will see in P@n results, a low number of bits give us full buckets but with a bad indexing. That is because the buckets are full of very different elements compared with each other. We note that the ideal case is that the LSH indexing method must store very similar elements in the same buckets. If we have a high number of bits, the elements in the buckets tend to be very similar at the expense of a very low bucket's occupancy (tend to be only one element per bucket).

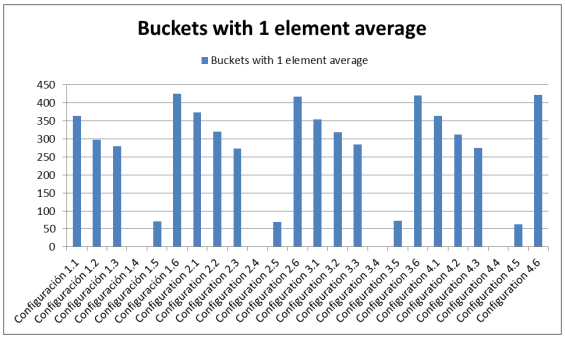


Figure 4: Buckets' occupancy

Finally, we talk about the matching test results based on P@n. The experiment contains four P@n (n=1, 2, 4 and 6). The relevant elements are the descriptor and its five transformations. The results are shown in Figure 5.

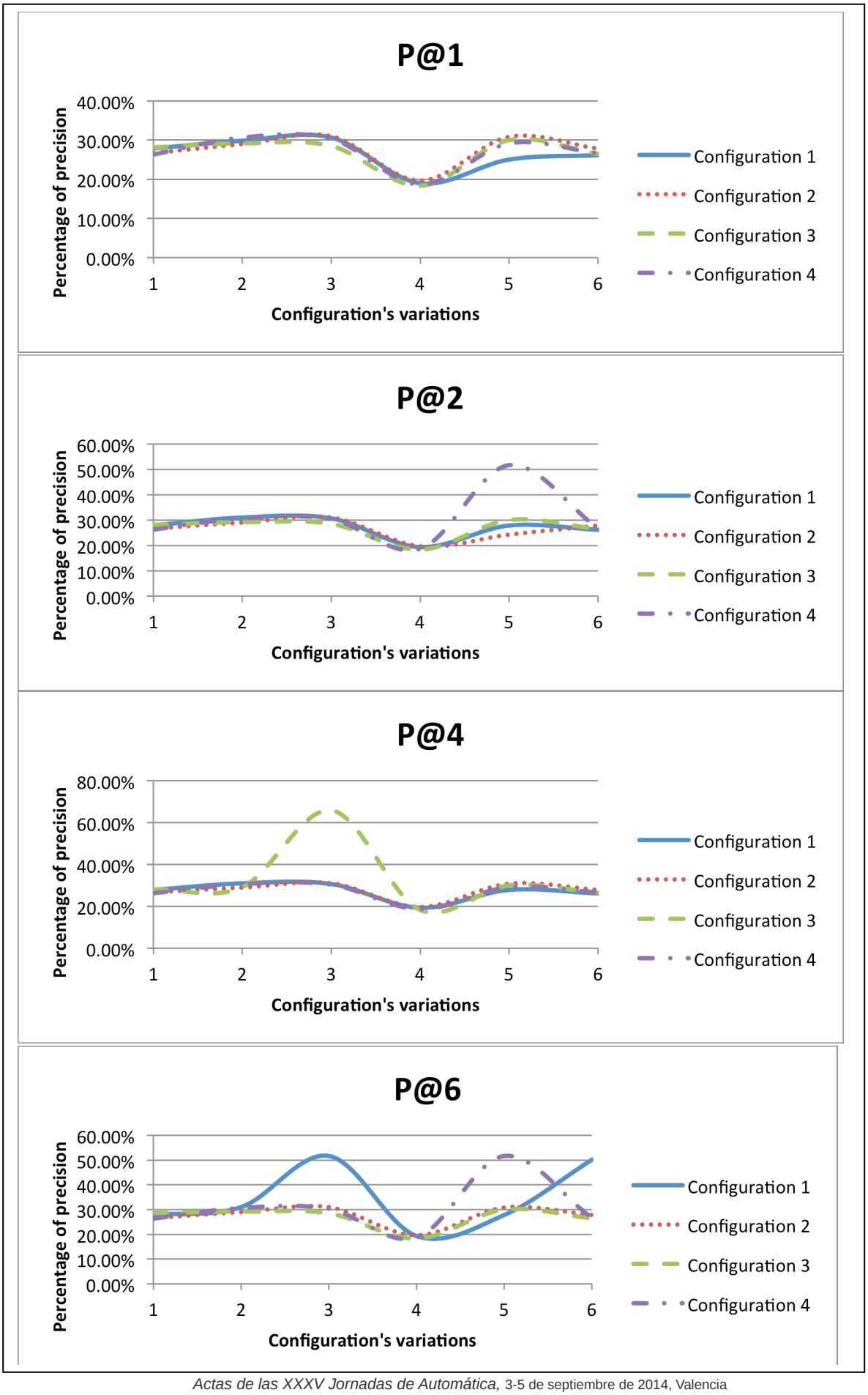
Using P@1 we can see that the configurations give us a percentage between 25% and 35% of correct matches (% successes), being better for the third sub configuration (20 tables and 20 bits) and worst for the fourth sub configuration (as we expect).

For P@2, an increase over 60% is produced by the Configuration 3.3 (Bucket size 18, #tables 20, #of hash key bits 20). This is the highest percentage in all the graphics.

If we continue increasing the parameter *n*, for P@4 we can see an increasing of precision for Configuration 4.5 (Bucket size 24, #tables 15, #of hash key bits 15), over 50%. The rest of configurations, as always, around the 30%.

Finally, for P@6 we can see an acceptable percentage over 50% for Configuration 1.3 (Bucket size 6, #tables 20, #of hash key bits 20), 1.6 (Bucket size 6, #tables 15, #of hash key bits 25) and for Configuration 4.5 (Bucket size 24, #tables 15, #of hash key bits 15). The rest give us a percentage around 30%. We need to find six relevant documents (remember, the descriptor and its five variants), so, this is a good measure for precision and recall.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5 CONCLUSIONS AND FUTURE DIRECTIONS

In this article we did an overview about the LSH method and the nearest neighbor problem. We also tested the LSH algorithm with many parameter configurations of the algorithm for indexing and retrieval video fingerprints to probe which is the best configuration.

As we see in experimental results section. The precision increases for a high number of bits of hash key. The configuration parameters are clear if we compare the data of Figure 4 and Figure 5. We try to keep the configuration with an acceptable percentage of precisions and bucket's occupation.

So, the final goal is to have the buckets with an acceptable number of elements (the ideal number is six, the descriptor and its variations), and to avoid buckets with just one element. If we compare the data of Figure 4 and Figure 5 we extract the following conclusions: for P@1 the best is the sub configuration 5 for all configurations but the precision percentage is lower (about 30%). For P@2 clearly, the configuration 3.3 with a percentage over 60% but have a high number of buckets with one element. For P@4 the configuration 4.5 is the best, have a precision percentage over 50% and a low number of buckets with one element. The same occurs for P@6.

In conclusion, we kept with P@6 because we have 6 relevant documents. The best configuration here is the configuration 4.5 (for P@4 and P@6) because give us a percentage over 50% and have the minimum number of buckets with one element, so this means that indexing was good and the buckets have an acceptable number of elements similar to each other. Then, it is better having a large bucket size (24 elements for this configuration) and a medium number of tables and hash key bits: 15 in both.

As future directions, we will test the configurations with SIFT descriptors in order to determine the best LSH configuration for those descriptors.

Acknowledgement
This work was supported by the DPI2012-36166 grant by the Spanish Government.

References

[1] A. Andoni and P. Indyck. (2008). Near-Optimal Hashing Algorithms for Apporximate Nearest Neighbor in High Dimensions. *Communications of the ACM, 51*(1), 117-122.

[2] Alaa El-Dien Mahmoud Hussein, M. A. (2011). *Searching Large-Scale Image Collections.* California Institute of Technology, Pasadena, California.

[3] Aly, M., Munich, M., & Perona, P. (s.f.). Bag Of Words For Large Scale Object Recognition: Properties and Benchmark. *Computational Vision Lab, Caltech, Pasadena, CA, USA; Evolution Robotics, Pasadena, CA, USA*.

[4] Andoni, A., & Indyck, P. (2006). *E2lsh: Exact Euclidean locality sensitive hashing*. Recuperado el 30 de 05 de 2014, de E2lsh: Exact Euclidean locality sensitive hashing: http://web.mit.edu/andoni/www/LSH/

[5] Bentley, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Comm. ACM 18*, 509-517.

[6] Buhler, J. (2001). Efficient large-scale sequence comparison by localyty-sensitive hashing. *Bioinform*(17), 419-428.

[7] Buhler, J., & Tompa, M. (2001). Finding motifs using random projections. *Proceedings of the Annual Meeting of the Association Of Computational Lingüistics*.

[8] Datar, M., Immorlic, N., Indyk, P., & Mirrokni, V. (2006.). Locality Sensitive Hashing using stable distributions. En T. Darrell, P. Indyck, & G. Shakhnarovich, *Nearest Neighbor Methods in Learning and Vision: Theory and Practice.* MIT Press.

[9] Dutta, D., Guha, R., & Chen, T. (2006). Scalable Partitioning and exploration of chemical spaces using geometric hashing. *J.Chem. Inf. Model. 46*.

[10] Gionis, A., Indyck, P., & Motwani, R. (1999). Similarity Search inHigh Dimensions via Hashing. *Proceedings of the 25th VLDB.* Edinburgh, Scotland.

[11] Haveliwata, T., Gionis, A., & Indyck, P. (2000). Scalable Techniques for clustering the web. *WebDB Workshop*.

[12] Indyck, P., & Motwani, R. (1998). Approximate Nearest Neighbor - Towards Removing the Curse of Dimensionality. *In Proceedings of the 30th Symposium on Theory of Computing*, (págs. 604-613).

[13] M. W. Powers, D. (2007). Evaluation: From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*.

[14] Ravichandran, D., Pantel, P., & Hovy, E. (2005). Randomized algorithms and nlp: Using locality sensitive hash functions for high speed non clustering. *Proceedings of the Annual Meeting of the Association Of Computational Lingüistics*.

[15] Samet, H. (2006). Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures. *Elsevier*.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tool wear monitoring in milling using aZIBO shape descriptor

María Teresa García-Ordás[1], Enrique Alegre[1], Joaquín Barreiro[1], Diego García-Ordás[1], Víctor González-Castro[2]
[1] Universidad de León, [2]École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne
{mgaro, enrique.alegre, joaquin.barreiro, dgaro}@unileon.es, victor.gonzalez@emse.fr

Abstract

In this paper, a tool wear monitoring process is carried out in order to determine the insert wear condition and to ensure the optimal usage of tools before their replacement during metal machining operations. The dataset is composed of 53 cutting inserts. All of them were pre-processed and their edge wear was segmented resulting in 212 edges set. To describe the wear shape, aZIBO shape descriptor was used and its results were compared with two classical descriptors, Hu and Flusser. The classification was carried out using kNN with 1, 3, 5, 7, 9 and 11 neighbours and six distances: Cosine, Euclidean, IntersetcDist, ChiSquare, SqDist and Cityblock. Two classifications have been carried out: One of them using three different classes (Low, Medium and High wexar -L, M and H, respectively-) and the other one with only two classes: Low (L) and High (H). aZIBO descriptor offers better results than the classical ones obtaining hit rates of 60.84% and and 81.13% using the L-M-H and the L-H labellings, respectively.

Keywords: aZIBO, Hu, Flusser, Tool wear, kNN

1 INTRODUCTION

Tool replacement operations lead to significant costs in metal machining processes. Not only the cost of cutting tools is important, but also, and maybe much more important, indirect costs derived from the unproductive time needed to perform the tool replacement. Usually, the replacement process consists of early stopping rules that reject the inserts irrespective of their actual wear condition. This kind of decisions make inefficient the machining operations in a very competitive production system. Tool wear condition can be determined manually or by automatic monitoring processes. Obviously automatic processes are preferred in highly automated systems. Automatic tool wear monitoring is traditionally based on indirect variables related to the production process like cutting time or number of parts produced, but these variables do not ensure the optimal usage of tools nor lead to minimal replacement costs, resulting in important economic losses. For these reasons, optimized monitoring systems based on tool wear measurement must be developed to increase competitiveness.

The main tool wear monitoring methods are detailed in [5, 13]. Nowadays, there are two main approaches to measure tool wear: direct and indirect measurement methods. Indirect methods provide wear estimates by monitoring observable variables related to wear, such as cutting forces [21, 20], vibrations [18] or power [19, 1]. Although these methods are the most used, noise signals at industrial environments severely undermine the quality of these estimates [14]. On the other hand, direct methods, usually based on computer vision systems, are definitely better in terms of accuracy and reliability. So the aim of this paper is to efficiently estimate insert wear to enlarge tool life and to decide about the right time for tool replacement using shape descriptors.

In the recent years, many shape descriptors have been proposed for multiple purposes. For example, in [8] two descriptors are proposed, multiscale fractal dimension and contour saliences using a graph based approach called image foresting transform. This method returns a root map, a cost map and a label map containing the relevant information of the contour points and its relationship with its influence area points using contour and skeleton based techniques. Later, this method was improved exploiting the resemblance between content-based image retrieval and image analysis in order to develop two new descriptors: contour and segment saliences testing their retrieval system with a fish dataset [7].

The concept of tensor scale, which is a morphometric parameter that unifies the representation of local structure thickness, orientation and anisotropy, is exploited by Andaló et al. [2]. The authors proposed a shape salience detector and descriptor which, as the previous method, use the Image Foresting Transform. Another method which uses information of the boundary points is the one proposed by García-Ordás et al. [16]. In

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

this work the minimum circumscribed circumference to the shape is constructed. Then, this region is divided into several bins and finally the descriptor is built taking into account the number of points corresponding to each bin.

Zhiyang Li et al. [15] proposed a geometry-based shape descriptor called ROMS which is a multiscale descriptor defined by the ratio of a triangle middle and side lines in each scale. In the work developed by Zagoris et al. [22] an MPEG-like descriptor that contains conventional contour and region shape features is proposed.

All these methods can be used in multiple applications. For example, in the medical field Hao et al. [11] proposed a method to automatically classify the invertebral disks as healthy or degenerated. The authors used active learning to avoid manual labeling for all training data. Proen et al. [17] focused on iris recognition technologies used in the biometric field. All these approaches can be used for tool wear description.

Besides, nowadays numerous researches are trying to improve efficiency of characterization by combining two or more shape descriptors. One example is the proposal developed by Singh et. al. [6] which is an effective descriptor based on angular radial transform (ART) and polar Hough transform (PHT). ART is used as a region based shape descriptor which represents global aspects of the image and PHT is used as local shape descriptor for detecting linear edges in the insert image. A similar approach is used in [3] based on an innovative trademark retrieval technique with improved performance due to integration of global and local descriptors. Zernike moments coefficients are used as global descriptor and the edge gradient coocurrence matrix derived from the contour information as local descriptor.

In this paper, we use aZIBO descriptor (absolute Zernike moment with Invariant Boundary Orientation) [10] and classical Hu and Flusser shape descriptors to describe the tool wear. The rest of the paper is organized as follows. In section 2, the relevant shape descriptors are described. In section 3, the process for obtaining the dataset, the experiments and results are shown. Finally, in section 4 conclusions are discussed.

2 METHODS

2.1 Classical descriptors. Hu and Flusser

Two classical descriptors, Hu and Flusser, were used to classify inserts wear. The results were compared with a new descriptor called aZIBO. Hu descriptor extracts seven normalized moments yielding a descriptor which results invariant to rotation, translation and scale [12]. Flusser descriptors are six invariant affine moments [9].

2.2 aZIBO

aZIBO is a shape descriptor proposed in [10] which combines global and local descriptors. In summary, the process is the following. Firstly, aZIBO uses Zernike moments as global shape descriptor employing the module of the first 36 coefficients up to the 10th order. Zernike moments module is invariant to rotation, which makes the global descriptor robust no matter what the image orientation is.

EGCM (Edge Gradient Coocurrence Matrix) is used as local descriptor. The first step to construct EGCM is to obtain the boundary points of the image uniformly sampled. In this case, the method proposed in [4] was used. An example of this detection process is shown in Figure 1.

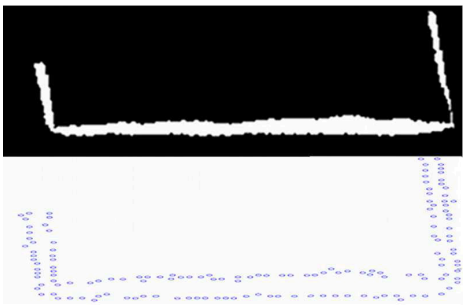


Figure 1: Example of boundary points extraction. Upper side: original image. Lower side: boundary points extraction.

The gradient orientation is calculated for each boundary point following the equation (1).

$$\phi(x,y) = \arctan\left(\frac{I(x+1,y) - I(x-1,y)}{I(x,y+1) - I(x,y-1)}\right) \quad (1)$$

All these gradient orientations are quantized to the following eight: East, North-East, North, North-West, West, South-West, South, South-East.

The next step is to construct the EGCM (Edge Gradient Coocurrence Matrix). We take into account the 8 neighbors of each boundary point pixel, considering only those which are part of the contour. The process is shown in Figure 2

To improve the description method, the local descriptor is made partially invariant to rotation. First of all, the dominant orientation ϕ_d of the image is obtained. Let $p_1 = (x_1, y_1)$ and $p_2 = (x_2, y_2)$ be the most distant points on the contour.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

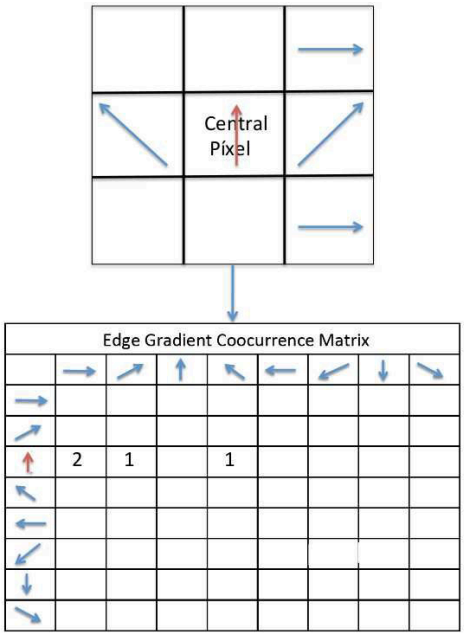


Figure 2: Edge Gradient Coocurrence Matrix construction for one pixel.

ϕ_d is considered as orientation of the vector $\overrightarrow{p_1 p_2}$:

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (2)$$

So the eight orientations in the EGCM are shifted placing the dominant orientation in the first position in the matrix. If EGCM is $[\phi_1, \phi_2, ..., \phi_d, ..., \phi_8]$, then IEGCM is $[\phi_d, ..., \phi_8, \phi_1, ..., \phi_{d-1}]$. Therefore, the same description is obtained for one image wherever its orientation is. Once this partially invariant matrix is constructed, the local descriptor is obtained by concatenating the eight matrix rows to obtain a 64-element descriptor. This process is not important in our case because all images have been pre-processed so that all of them have the same orientation as explained in section 3.1.

Therefore, the final descriptor is composed of the module of the first 36 Zernike moments extracted from the original binary images and the Invariant Edge Gradient Co-occurrence Matrix concatenated by rows.

3 EXPERIMENTS AND RESULTS

3.1 Dataset

The aim of this paper is to efficiently estimate cutting inserts wear and to improve the decision making for tool replacement time using shape descriptors. To deal with this, a set of 53 inserts with different levels of wear were selected. Figure 3 shows some images as example.

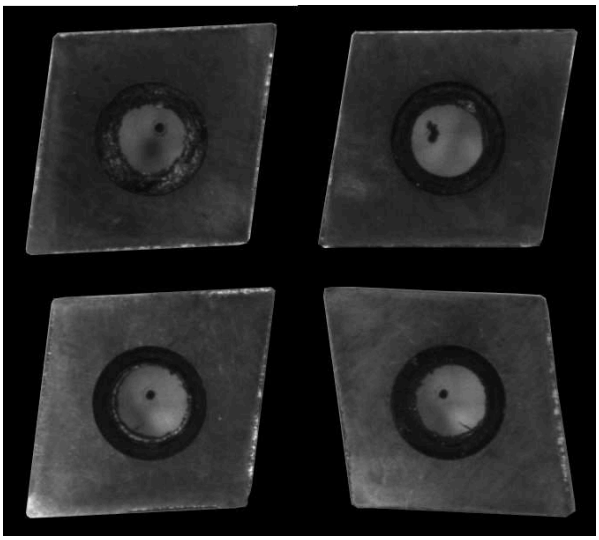


Figure 3: Inserts dataset example. The insert in the south-east presents a wear of medium level in the right border, a low level wear in the left and it has not wear in the other two edges.

The insert gray-scale images with masked background are subjected to a pre-processing step that yields four new images, one for each cutting edge in horizontal position. The pre-processing is carried out as follows.

The first step consists on removing the central portion of the insert, masking out a circular region. Firstly, we need to determine the center and radius of the circle. To determine the circle center, the image is binarized using a 0.01 threshold - obtained empirically -, resulting in an image with the pixels of the insert area set to 1 and the rest to 0. Then, we calculate the centroid of this area that will be the center of the central circle. Using this binary image, we also obtain the length of the major axis, being the radius of the circle 1/5 of its length. After this process, we obtain a gray-scale image with both its background and central region masked out. This image will be used to extract the four cutting edges.

The next step is to describe the edges extraction process. Only the extraction of the west edge is explained; the rest of edges -north, east and south- are extracted applying the same procedure rotating the original image 90°, 180° and 270°, respectively. Using the gray-scale image resulting from the previous step, a vertical Sobel filter is applied to detect the inserts contours. These contours are then dilated and opened, and vertically projected onto the horizontal axis. The first element in this projection non-equal to zero indicates the

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

x coordinate of the image where the cutting edge starts. Once the starting x coordinate is determined, the image of the cutting edge is cropped from the starting x position to a 100 pixels width while maintaining the same height as the original image. A parametric margin is added that allows us to increase the crop area, because experimental tests showed that some inserts lost some edge pixels due to too tight crops.

Once the four cutting edges have been extracted and their crops have been rotated to horizontal position (leaving the edge heading to south), the edges are aligned to horizontal position. Since inserts are not square-shaped but rhomboid-shaped instead, and their cutting edges are not aligned with the vertical and horizontal axis, the edges images need to be rotated to obtain alignment of the edges with the horizontal axis. To carry out this operation, a horizontal Sobel filter followed by a dilation is applied. The resulting image is filtered to remove smaller objects leaving a binary image containing just the cutting edge. This edge is inscribed in an ellipse whose major axis is obtained. The orientation of this major axis is the same than the orientation of the cutting edge with respect to the horizontal axis. After obtaining this orientation, the original cutting edge image is rotated to compensate this orientation, leaving the cutting edges aligned to horizontal position.

After all this process, a dataset composed by 212 binary images is obtained. Figure 4 shows an example.

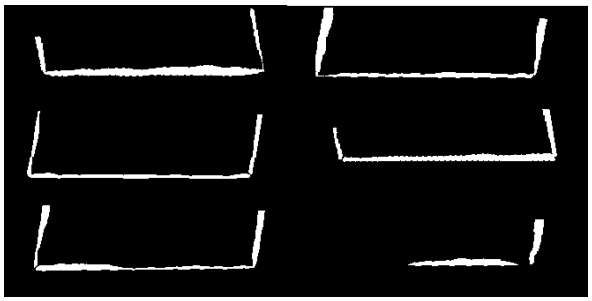


Figure 4: Dataset example.

3.2 Setup

Many retrieval methods exist but most of them are very expensive in terms of computational cost. kNN classification was used with k equals to 1, 3, 5, 7, 9 and 11 and six distances: Cosine, Euclidean, Intersect, Chisquare, SqDist and Cityblock to classify the concatenation of the global and local shape descriptor explained in the previous sections. Two types of classification were applied: the first one considering three classes (low (L), medium (M) and high (H) wear) and the second one considering two classes (low (L) and high (H) wear).

3.3 Results

As aforementioned the classification was carried out using six distances. In Tables 1 and 2 the best hit rates obtained in the classifications using the three description methods (aZIBO, Hu and Flusser) are shown. Cosine, ChiSquare, SqDist and Cityblock represent always the best cases. As shown, aZIBO obtains better results than classical descriptors obtaining a hit rate up to 60.37% when using three wear classes and 81.13% when using two wear classes.

Table 1: Inserts classification using aZIBO proposal and Hu and Flusser classical descriptors with k equals to nine and Cosine, ChiSquare, SqDist and Cityblock distances using 3 classes labeling.

	Cosine	ChiSquare	SqDist	Cityblock
aZIBO	58.96%	57.07%	60.37%	59.43%
Hu	55.66%	56.13%	59.91%	58.49%
Flusser	57.07%	58.96%	57.08%	57.08%

Table 2: Inserts classification using aZIBO proposal and classical Hu and Flusser descriptors with k equals to nine and Cosine, ChiSquare, SqDist and Cityblock distances using 2 classes labeling.

	Cosine	ChiSquare	SqDist	Cityblock
aZIBO	81.13%	80.66%	81.13%	81.13%
Hu	76.89%	79.72%	79.25%	80.19%
Flusser	79.25%	78.30%	75.47%	75.47%

Figure 5 shows with more detail all the results for aZIBO, Hu and Flusser, for all k values and the six distances.

As we can see, L-H classification always offers better results than L-M-H classification although it provides less information. Also, aZIBO outperforms classical descriptors in almost all cases.

4 CONCLUSIONS

A tool wear monitoring system has been developed to determine the edge condition of metal cutting inserts. To carry out this process three shape descriptors were evaluated using an edge wear dataset made of 212 images and two different classifications, one with three wear classes

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

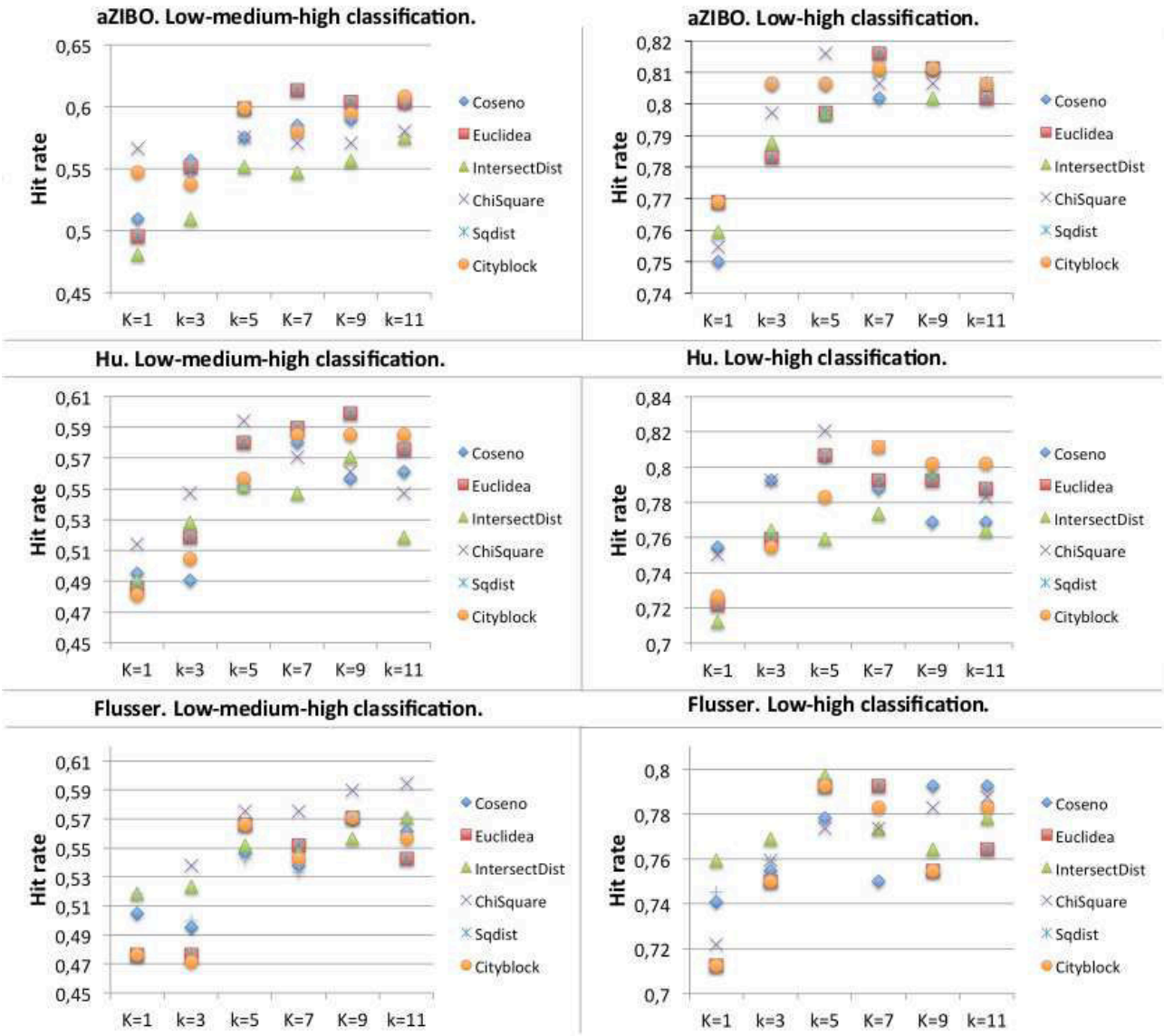


Figure 5: kNN classification for the six distances and different values of k using aZIBO, Hu and Flusser and two kinds of labeling datasets: L-M-H and L-H classes.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

(low, medium and high) and the other one with two classes (low and high). Two classical moment descriptors, Hu and Flusser, were firstly tested. The best results for this initial test were 59.91% of hit rate achieved using Hu and Square distance with three classes classification, and 80.19% using Hu and Cityblock with two classes. Secondly, the recently developed aZIBO descriptor based on Zernike and contour points orientations was evaluated. Results in this case indicates 60.37% of hit rate based on three classes and 81.13% of hit rate using the binary classification, that is an outperformance of 0.7% a 1.17% with regard to the moment based descriptors. Furthermore, aZIBO descriptor shows more stability against distance metric used in the k-nearest neighbor process, being the maximum hit rate difference 0,47% instead of 3,3% obtained with Hu and Flusser. Therefore, it can be concluded that the use of aZIBO to determine cutting tool wear increments the performance of monitoring systems and it represents an interesting approach.

Acknowledgements

This work has been supported by the DPI2012-36166 grant by the Spanish Government.

References

[1] F. Al-Sulaiman, M. Baseer, and A. Sheikh. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3):364–371, 2005.

[2] F.A. Andal, P.A.V. Miranda, R. da S. Torres, and A.X. Falco. Shape feature extraction and description based on tensor scale. *Pattern Recognition*, 43:26–36, 2010.

[3] F.M. Anuar, R. Setchi, and Y-K. Lai. Trademark image retrieval using an integrated shape descriptor. *Expert Systems with Applications*, 40(1):105 – 121, 2013.

[4] Serge Belongie, Jitendra Malik, and Jan Puzicha. Shape matching and object recognition using shape contexts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24:509–522, 2001.

[5] M.S.H. Bhuiyan and I.A. Choudhury. Review of sensor applications in tool condition monitoring in machining. *Comprehensive Materials Processing*, 13:539–569, 2014.

[6] P. Chandan. An effective image retrieval using the fusion of global and local transforms based features. *Optics & Laser Technology*, 44:2249–2259, 2012.

[7] R. da S. Torres and A.X. Falco. Contour salience descriptors for effective image retrieval and analysis. *Image and Vision Computing*, 25:3–13, 2007.

[8] R. da S. Torres, A.X. Falco, and L. da F. Costa. A graph-based approach for multiscale shape analysis. *Pattern Recognition*, 37:1163–1174, 2004.

[9] J Flusser. Moment invariants in image analysis. *Proceesings of world academy of science*, 2006.

[10] M.T. García-Ordás, E. Alegre, V. González-Castro, and D. García-Ordás. azibo. a new descriptor based in shape moments and rotational invariant features. *ICPR (International Conference on Pattern Recognition)*, 2014.

[11] S. Hao, J. Jiang, Y. Guo, and H. Li. Active learning based intervertebral disk classification combining shape and texture similarities. *Neurocomputing*, 101(0):252 – 257, 2013.

[12] M-K. Hu. Visual pattern recognition by moment invariants. *Information Theory, IRE Transactions*, 8, 1962.

[13] S. Jie, W.Y. San, H.G. Soon, M. Rahman, and W. Zhigang. Identification of feature set for effective tool condition monitoring- a case study in titanium machining. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 23–26, 2008.

[14] J. Jurkovic, M. Korosec, and J. Kopac. New approach in tool wear measuring technique using ccd vision system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9):1023–1030, 2005.

[15] Z. Li, W. Qu, J. Cao, Z. Su, and H. Qi. Geometry-based 2d shape descriptor for retrieval in large database. *Signal Processing (ICSP)*, 2:1096–1101, 2012.

[16] María Teresa García Ordás, Enrique Alegre, Oscar García Olalla, and Diego García Ordás. Evaluation of different metrics for shape based image retrieval using a new contour points descriptor. *Similrity Search in applications SISAP*, 2013.

[17] H. Proen and G. Santos. Fusing color and shape descriptors in the recognition of degraded iris images acquired at visible wavelengths. *Computer Vision and Image Understanding*, 116(2):167 – 178, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[18] K.V. Rao, B.S.N. Murthy, and N.M. Rao. Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece in boring of aisi 316 steel with artificial neural network. *Measurement*, 51:63–70, 2014.

[19] H. Shao, H. Wang, and X. Zhao. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14):1503–1509, 2004.

[20] G. Wang, Z. Guo, and Y. Yang. Force sensor based online tool wear monitoring using distributed gaussian artmap network. *Sensors and Actuators A: Physical*, 192(1):111–118, 2013.

[21] G. Wang, Y. Yang, and Q. Xieand Y. Zhang. Force based tool wear monitoring system for milling process based on relevance vector machine. *Advances in Engineering Software*, 71:46–51, 2014.

[22] K. Zagoris, K. Ergina, and N. Papamarkos. Image retrieval systems based on compact shape descriptor and relevance feedback information. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 22(5):378 – 390, 2011.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Mejorando los sistemas de predicción basados en error acotado

J.M. Bravo, D. Marín y M.E. Gegúndez
Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva
email:{caro,diego.marin,gegundez}@uhu.es
T. Alamo
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
email:teodoroalamo@gmail.com

Resumen

La presente comunicación presenta un método de predicción basado en técnicas de error acotado. El objetivo es predecir la salida de un sistema no lineal utilizando como fuente de información datos de entrada-salida previamente almacenados. Cada vez que se necesita una predicción, se consultan dichos datos, se construye un modelo lineal local y se genera la predicción. Estos métodos utilizan datos en la vecindad del punto de interés para obtener la predicción. Dicha predicción es de corte intervalar, siendo posible utilizar el centro de este intervalo como predicción nominal. La aportación de este trabajo es proponer una modificación de los métodos de predicción presentes en la literatura para disminuir el error cometido por la predicción central. Dicha modificación aumenta el número de puntos considerados en la vecindad a la hora de construir la predicción. La contrapartida es un aumento en el tamaño del intervalo de predicción obtenido y del esfuerzo computacional requerido.

Palabras clave: Predicción, error acotado, identificación de sistemas.

1 INTRODUCCIÓN

Para predecir la salida de un sistema dinámico no lineal se puede utilizar un modelo de dicho sistema. Con el fin de obtener dicho modelo, una posibilidad es asumir que el comportamiento del sistema se puede aproximar mediante una familia de modelos [5]. Esta familia se obtiene mediante la parametrización de cierta estructura. Para determinar el valor de los parámetros adecuados, se formula un problema de optimización donde las variables son los parámetros del modelo y el objetivo es minimizar el error de predicción del modelo en un conjunto de medidas de entrada-salida. Una alternativa a este procedimiento es considerar cierto error acotado en las medidas del sistema. A este tipo de técnicas se las conoce en la literatura como métodos de identificación basados en error acotado [7]. El objetivo de los métodos de identificación basados en error acotado es obtener el conjunto de parámetros que son consistentes con el modelo, las medidas adquiridas y la cota considerada en el término de error. A este conjunto se le denomina Conjunto Solución Factible (FSS). En modelos paramétricos lineales, el FSS se puede calcular de forma exacta [3, 10]. Sin embargo, la complejidad del FSS se incrementa con cada nueva medida. En la literatura se propone utilizar Conjuntos Solución Factibles Aproximados ($AFSS$) con complejidad limitada que acoten externamente al FSS. Cajas [6], elipsoides [4], paralelotopos [12] y zonotopos [2] se han usado como $AFSS$.

Una estrategia diferente a lo expuesto anteriormente es no utilizar un modelo paramétrico general para obtener la predicción. En este caso se utiliza un histórico de medidas de entrada-salida del sistema que ha sido almacenado previamente en una base de datos. Cuando se necesita una predicción para cierto punto, se recuperan datos de una vecindad de este punto y se forma una predicción (ver los modelos bajo demanda o 'Just-in-Time' propuestos en [11, 13]). Desde el punto de vista de las técnicas basadas en error acotado, en [8] se propone un esquema de este tipo. Esta metodología se basa en obtener una aproximación de la constante de Lipschitz de la forma funcional del sistema mediante datos experimentales almacenados. Para obtener las predicciónes se utilizan esta aproximación y los datos experimentales.

En esta comunicación se propone un nuevo método de predicción de la salida de sistemas dinámico no lineales, utilizando técnicas de error acotado y aproximaciones lineales basadas en datos almacenados. Cuando se requiere una predicción, se construye un modelo local lineal utilizando los datos experimentales almacenados y se genera la predicción. La predicción obtenida es de tipo intervalar proporcionando un límite superior e inferior de la salida del sistema. El objetivo de este trabajo es proponer un método que disminuya el error de predicción de los métodos basados en error acotado presentes en la literatura. Concretando, se pretende disminuir el error de predicción cometido por el centro de la predicción intervalar sin que aumente demasiado la anchura de dicho intervalo. Básicamente la nueva técnica consiste en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

forzar un incremento en el número de puntos utilizado para crear la predicción intervalar. Este aumento consigue disminuir el error cometido por la predicción central, lo que constituye un propiedad positiva. Sin embargo, como contrapartida, desde el punto de vista del error acotado se aumenta la incertidumbre y por tando la anchura del intervalo predicción.

La estructura de la comunicación se resume a continuación. En la sección 2 se trata la formulación del problema. El sistema de predicción propuesto y algunas de sus propiedades se presenta en la sección 3. El método propuesto se ilustra con un ejemplo en la sección 4. Finalmente la sección 5 proporciona algunas conclusiones.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese el siguiente sistema discreto no lineal

$$y_k = f_0(x_k) \tag{1}$$

donde k es el instante de tiempo discreto, $y_k \in \mathbb{R}$ es la salida del sistema, $x_k \in X \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$ son las entradas y salidas pasadas del sistema $x_k = [y_{k-1}, y_{k-2}, ..., y_{k-\mu_y}, u_k, u_{k-1}, ..., u_{k-\mu_u}]$ y X es un conjunto compacto. Notar que $n_x = \mu_y + \mu_u + 1$. Se supone que el sistema $f_0(\cdot)$ es desconocido. Sin embargo, un conjunto de medidas con ruido $\tilde{y}_i$ y $\tilde{x}_i$ siendo $i = 1, ..., N$ está disponible. Esta condición constituye la Hipótesis 1.

Hipótesis 1 *Se dispone del conjunto de medidas* $\mathcal{D} = \{(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i),\ con\ i = 1, ..., N\}$.

Dado un vector $\tilde{x}_k$ los predictores propuestos en esta comunicación utilizan el conjunto $\mathcal{D}$ para inferir la salida del sistema no lineal. Sin embargo se asume también que el conjunto $\mathcal{D}$ se puede dividir en η subconjuntos.

Hipótesis 2 *Dada un entero positivo* η *se dispone de un sistema de división tal que* $\mathcal{D} = \bigcup_{i=1}^{\eta} \mathcal{D}(i)$ *y* $\mathcal{D}(i) \bigcap \mathcal{D}(l) = \emptyset$ *con* $i, l = 1, ..., \eta$ *y* $i \neq l$. *Cada subconjunto* $\mathcal{D}(i)$ *se define como* $\mathcal{D}(i) = \{(\tilde{x}_{s_{i,j}}, \tilde{y}_{s_{i,j}}),\ con\ j = 1, ..., N_i\}$ *donde los índices* $s_{i,j}$ *cumplen la pertenencia* $s_{i,j} \in \{1, ..., N\}\ \forall i, j$ *y se tiene la suma* $\sum_{i=1}^{\eta} N_i = N$.

En identificación paramétrica, normalmente se asume que la función no lineal $f_0(\cdot)$ pertenece a una familia parametrizada de funciones en las que los parámetros son los grados de libertad que se consideran. En este caso, un método de identificación se utiliza para obtener una estimación de los parámetros. Sin embargo la elección de la familia de funciones apropiada es un problema abierto en identificación de sistemas no lineales. Con objeto de evitar este problema, en esta comunicación se utiliza una aproximación lineal local. Se asume que la función $f_0(\cdot)$ se puede aproximar en cada punto mediante una función afín de pendiente acotada. A continuación se proporciona una definición formal.

Hipótesis 3 *Existe el par de constantes positivas* σ *y* L *tal que por cada vector de medidas* $\tilde{x}_k \in X$ *con* $k > N$, *existe* $\theta_k \in \mathbb{R}^{n_r}$ *tal que*

$$y_k = [\tilde{x}_k^T\ 1]\theta_k \tag{2}$$

$$|\tilde{y}_i - [\tilde{x}_i^T\ 1]\theta_k| \leq \sigma + L||\tilde{x}_i - \tilde{x}_k|| \ con\ i = 1, ..., N \tag{3}$$

donde $|\cdot|$ *denota valor absoluto y* $||\cdot||$ *norma.*

Básicamente se está asumiendo que cada instante de tiempo k, el sistema (1) se puede aproximar mediante un modelo local desde el punto de vista de error acotado. La constante σ acota el error presente en la medida de la salida, esto es, $|\tilde{y}_i - y_i| \leq \sigma$ donde $i = 1, ..., N$. La constante L acota el máximo ratio de cambio considerado para la función $f_0(\cdot)$. Por tanto, cuanto mayor es L, mayor es la capacidad de cambio permitido para la función $f_0(\cdot)$. Notar que σ y L son información conocida a priori. En caso de que estas constantes no estubiesen disponible, sería necesario estimarlas. Se podría utilizar un conjunto de datos de entrenamiento y algún método de validación cruzada para obtenerlas [5].

3 PREDICTOR INTERVALAR

Un predictor intervalar es un operador que, dado un valor $\tilde{x}_k \in X$, proporciona una estimación de las cotas máxima y mínimas del valor correspondiente a $f_0(x_k)$. A continuación se presenta un operador basado en técnicas de error acotado que proporciona predicciones intervalares de sistemas no lineales utilizando datos almacenados.

3.1 FORMULACIÓN DEL PREDICTOR

Definición 1 *Predictor. Dado un vector* $\tilde{x}_k \in X$, *un conjunto de medidas* $\mathcal{D}$ *que cumple la Hipótesis 3, una partición* $\mathcal{D} = \bigcup_{i=1}^{\eta} \mathcal{D}(i)$ *definida en la Hipótesi 2, los vectores* $\underline{\lambda}(i), \overline{\lambda}(i) \in \mathbb{R}^{N_i}$ *y unas constantes* $\underline{\alpha}_i, \overline{\alpha}_i$ *siendo* $i = 1, ..., \eta$, *un predictor intervalar* $f_\lambda(\tilde{x}_k) = [\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k), \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k)]$ *se puede*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

definir mediante las expresiones

$$\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k) = \sum_{i=1}^{\eta} \underline{\alpha}_i \left(-|\underline{\lambda}(i)|^T b_{L_R}(i) + \underline{\lambda}^T(i) b_{Y_R}(i) \right) \tag{4}$$

$$\overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k) = \sum_{i=1}^{\eta} \overline{\alpha}_i \left(|\overline{\lambda}(i)|^T b_{L_R}(i) + \overline{\lambda}^T(i) b_{Y_R}(i) \right) \tag{5}$$

donde $|\lambda|$ *denota un vector cuyos elementos son el valor absoluto de los elementos del vector* λ*. Los vectores* $b_{L_R}(i)$ *y* $b_{Y_R}(i)$ *se definen mediante*

$$b_{L_R}(i) = \begin{bmatrix} \sigma + L||\tilde{x}_k - \tilde{x}_{s_{i,1}}|| \\ \sigma + L||\tilde{x}_k - \tilde{x}_{s_{i,2}}|| \\ \vdots \\ \sigma + L||\tilde{x}_k - \tilde{x}_{s_{i,N_i}}|| \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$b_{Y_R}(i) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{s_{i,1}} & \tilde{y}_{s_{i,2}} & \dots & \tilde{y}_{s_{i,N_i}} \end{bmatrix}^T. \tag{7}$$

Los vectores $\underline{\lambda}(i), \overline{\lambda}(i) \in \mathbb{R}^{N_i}$ *con* $i = 1, ..., \eta$*, se obtienen resolviendo los siguientes problemas de optimización.*

$$\begin{array}{rcll} \overline{\lambda}(i) = & \underset{\lambda}{arg\,\min} & |\lambda|^T b_{L_R}(i) + \lambda^T b_{Y_R}(i) \\ & s.t. & A_R^T(i)\lambda = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \end{array} \tag{8}$$

$$\begin{array}{rcll} \underline{\lambda}(i) = & \underset{\lambda}{arg\,\max} & -|\lambda|^T b_{L_R}(i) + \lambda^T b_{Y_R}(i) \\ & s.t. & A_R^T(i)\lambda = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \end{array} \tag{9}$$

Las matrices $A_R^T(i)$ *se definen mediante la expresión*

$$A_R^T(i) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{s_{i,1}} & \tilde{x}_{s_{i,2}} & \dots & \tilde{x}_{s_{i,N_i}} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

El operador descrito en la Definición 1 utiliza 2η problemas de optimización lineal con restriccines para obtener la predicción intervalar. Hay que tener en cuenta que existen algoritmos muy eficientes que resuelven dicho tipo de problemas [1].

Observación 1 *Cuando* $\eta = 1$ *el predictor intervalar de la Definición 1 es el mismo que se puede obtener aplicando los conceptos presentados en [6, 9] a las Hipótesis 1 y 3.*

A continuación se incluye una sucesión de igualdades que demuestran la afirmación enunciada en la Observación 1. Básicamente el razonamiento se basa en aplicar dualidad con el fin de llegar a la formulación utilizada en [6, 9]. Recordar que para este caso $\eta = 1$. Denotando $b_{L_e} = [b_{L_R}^T \ \ b_{L_R}^T]^T$, $b_{Y_e} = [b_{Y_R}^T \ \ -b_{Y_R}^T]^T$ y $A_e = [A_R^T \ \ -A_R^T]^T$ se tiene que

$$\begin{array}{rcll} \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k) = & \min\limits_{\lambda} & |\lambda|^T b_{L_R} + \lambda^T b_{Y_R} \\ & s.t. & A_R^T \lambda = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \\ = & \min\limits_{\beta} & \beta^T b_{L_e} + \beta^T b_{Y_e} \\ & s.t. & A_e^T \beta = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \\ & & \beta_j \geq 0 \text{ con } j = 1, ..., N \\ = & \max\limits_{\theta} & [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \theta \\ & s.t. & A_e \theta \leq b_{L_e} + b_{Y_e} \\ = & \max\limits_{\theta} & [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \theta \\ & s.t. & |A_R \theta - b_{Y_R}| \leq b_{L_R}. \end{array}$$

De la misma forma se puede obtener el límite inferior $\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k)$.

Propiedad 1 *Nótese que usando las expresiones (4) y (5) se puede obtener una predicción central denotada como* $\bar{y}_k^c$ *mediante la expresión*

$$\begin{array}{rcl} \bar{y}_k^c & = & \frac{1}{2}\left(\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k) + \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k) \right) \\ & = & \frac{1}{2} \sum\limits_{i=1}^{\eta} \left(\overline{\alpha}_i \overline{\lambda}^T(i) + \underline{\alpha}_i \underline{\lambda}^T(i) \right) b_{Y_R}(i) \\ & & + \frac{1}{2} \sum\limits_{i=1}^{\eta} \left(\overline{\alpha}_i |\overline{\lambda}^T(i)| - \underline{\alpha}_i |\underline{\lambda}^T(i)| \right) b_{L_R}(i)) \\ & = & \frac{1}{2} \sum\limits_{i=1}^{\eta} \sum\limits_{j=1}^{N_i} \left(\overline{\alpha}_i \overline{\lambda}_j^T(i) + \underline{\alpha}_i \underline{\lambda}_j^T(i) \right) \tilde{y}_{s_{i,j}} \\ & & + \frac{\sigma}{2} \sum\limits_{i=1}^{\eta} \sum\limits_{j=1}^{N_i} \left(\overline{\alpha}_i |\overline{\lambda}_j^T(i)| + \underline{\alpha}_i |\underline{\lambda}_j^T(i)| \right) \\ & & + \frac{L}{2} \sum\limits_{i=1}^{\eta} \sum\limits_{j=1}^{N_i} \left(\overline{\alpha}_i |\overline{\lambda}_j^T(i)| + \underline{\alpha}_i |\underline{\lambda}_j^T(i)| \right) \\ & & ||\tilde{x}_{s_{i,j}} - \tilde{x}_k||. \end{array}$$

Observación 2 *El número de salidas medidas* $\tilde{y}_{s_{i,j}}$ *usadas para obtener la predicción central* $\bar{y}_k^c$ *depende del número de componentes de los vectores* $\overline{\lambda}(i), \underline{\lambda}(i)$ *que son diferentes a 0. Los problemas de optimización (8) y (9) incluyen un término de regularización* $|\lambda|^T b_{L_R}(i)$ *y una restricción de igualdad* $A_R^T(i)\lambda = \tilde{x}_k$ *que limitan este número. Es de esperar que el número de componentes diferentes a 0 en cada vector óptimo* $\overline{\lambda}(i)$ *y* $\underline{\lambda}(i)$ *sea* n_x *(la dimensión de* $\tilde{x}_k$*). Por tanto el número total esperado de salidas usadas para obtener la predicción central será* $2\eta n_x$*. Nótese que ese número se incrementa con el parámetro de diseño* η*. Una demostración formal de esta observación se podría realizar suponiendo independencia lineal los vectores* $\tilde{x}_i$ *y la desigualdad* $\tilde{x}_i \neq \tilde{x}_k$ *para todo* i *y* k*.*

3.2 PREDICCIÓN GARANTISTA

A continuación se presenta un teorema que proporiona una condición para obtener una predicción intervalar garantista de la salida del sistema.

Teorema 1 *Considérese el predictor* $f_\lambda(\tilde{x}_k)$ *obtenido mediante la Definición 1. Si las*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

constantes $\overline{\alpha}_i, \underline{\alpha}_i$ *se eligen de tal forma que*

$$\sum_{i=1}^{\eta} \underline{\alpha}_i A_R^T(i)\underline{\lambda}(i) = \sum_{i=1}^{\eta} \overline{\alpha}_i A_R^T(i)\overline{\lambda}(i) = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T \tag{11}$$

entonces se cumple que:

$$\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k) \leq y_k \leq \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k) \ \forall \tilde{x}_k \in X.$$

PRUEBA :

Sin pérdida de generalidad se considera que

$$A_R^T = \left[A_R^T(1) \ \ A_R^T(2) \ \ ... \ \ A_R^T(\eta)\right]$$

$$\overline{\lambda}_\alpha^T = \left[\overline{\alpha}_1\overline{\lambda}(1) \ \ \overline{\alpha}_2\overline{\lambda}(2) \ \ ... \ \ \overline{\alpha}_\eta\overline{\lambda}(\eta)\right]$$

$$\underline{\lambda}_\alpha^T = \left[\underline{\alpha}_1\underline{\lambda}(1) \ \ \underline{\alpha}_2\underline{\lambda}(2) \ \ ... \ \ \underline{\alpha}_\eta\underline{\lambda}(\eta)\right].$$

Entonces de la igualdad (11) se obtiene que $A_R^T\overline{\lambda}_\alpha = A_R^T\underline{\lambda}_\alpha = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T$. Dado un vector $\tilde{x}_k \in X$, el Conjunto Solución Factible, denotado $\Theta(\tilde{x}_k)$, es el conjunto de parámetros consistente con las medidas disponibles en el conjunto $\mathcal{D}$, una cota máxima de error σ y cierta constante predefinida $L \in \mathbb{R}^+$. Por tanto, $\Theta(\tilde{x}_k)$ se define como $\Theta(\tilde{x}_k) = \{ \ \theta \in \mathbb{R}^{n_x}, \ |\tilde{y}_i - [\tilde{x}_i^T \ 1]^T\theta| \leq \sigma + L||\tilde{x}_i - \tilde{x}_k|| \text{ con } (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \in \mathcal{D}\}$. El conjunto $\Theta(\tilde{x}_k)$ se puede reescribir en forma matricial como $\Theta(\tilde{x}_k) = \{ \ \theta \in \mathbb{R}^{n_x}, \ |A_R\theta - b_{Y_R}| \leq b_{L_R}\}$.

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones,

- por Hipótesis 3, para cualquier $\tilde{x}_k$ existe $\theta_k \in \Theta(\tilde{x}_k)$ tal que $y_k = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T\theta_k$.
- $A_R^T\overline{\lambda}_\alpha = A_R^T\underline{\lambda}_\alpha = [\tilde{x}_k^T \ 1]^T$
- $\Theta(\tilde{x}_k) = \{ \ \theta \in \mathbb{R}^{n_r}, \ |A_R\theta - b_{Y_R}| \leq b_{L_R}\}$

entonces se puede probar que

$$\begin{aligned}
y_k &= [\tilde{x}_k^T \ 1]^T\theta_k, \ \text{con } \theta_k \in \Theta(\tilde{x}_k) \\
&\leq \max [\tilde{x}_k^T \ 1]^T\theta, \ \theta \in \Theta(\tilde{x}_k)\} \\
&= \max \{\overline{\lambda}_\alpha^T A_R\theta, \ \theta \in \Theta(\tilde{x}_k)\} \\
&= \max \{\overline{\lambda}_\alpha^T(A_R\theta - b_{Y_R}) + \overline{\lambda}_\alpha^T b_{Y_R}, \ \theta \in \Theta(\tilde{x}_k)\} \\
&\leq \max \{|\overline{\lambda}_\alpha|^T|A_R\theta - b_{Y_R}| + \overline{\lambda}_\alpha^T b_{Y_R}, \ \theta \in \Theta(\tilde{x}_k)\} \\
&\leq \max \{|\overline{\lambda}_\alpha|^T b_{L_R} + \overline{\lambda}_\alpha^T b_{Y_R}, \ \theta \in \Theta(\tilde{x}_k)\} \\
&= |\overline{\lambda}_\alpha|^T b_{L_R} + \overline{\lambda}_\alpha^T b_{Y_R} \\
&= \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k).
\end{aligned}$$

Por otro lado, la desigualdad $y_k \geq \underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k)$ se puede probar de forma similar. Por tanto se infiere que $\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k) \leq y_k \leq \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k), \ \forall \tilde{x}_k \in X.$ ■

3.3 ELECCIÓN PESOS $\overline{\alpha}_i, \underline{\alpha}_i$

Con objeto de obtener valores apropiados para los pesos $\overline{\alpha}_i, \underline{\alpha}_i$ se propone resolver el siguiente problema de optimización.

$$\begin{aligned}
\left[\overline{\alpha}_1^*, ..., \overline{\alpha}_\eta^*\right] = \ & arg \min_{\alpha_1,...,\alpha_\eta} \ \sum_{i=1}^{\eta} \alpha_i^2 ||\overline{\lambda}(i)||_1 \\
& s.t. \qquad \sum_{i=1}^{\eta} \alpha_i = 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left[\underline{\alpha}_1^*, ..., \underline{\alpha}_\eta^*\right] = \ & arg \min_{\alpha_1,...,\alpha_\eta} \ \sum_{i=1}^{\eta} \alpha_i^2 ||\underline{\lambda}(i)||_1 \\
& s.t. \qquad \sum_{i=1}^{\eta} \alpha_i = 1
\end{aligned}$$

Los problemas de optimización propuestos presentan un conjunto de características positivas. A continuación se enumeran.

- Proporcionan un compromiso entre la predicción de menor tamaño intervalar y una predicción central que utilice un gran número de salidas. Se penalizan los casos con valores grandes en los vectores $\overline{\lambda}(i), \underline{\lambda}(i)$, pero no se eliminan asignándole un 0.
- El problema de optimización tiene una solución explícita. Los valores óptimos $\overline{\alpha}_i^*, \underline{\alpha}_i^*$ con $i = 1, ..., \eta$ se obtienen mediante las expresiones

$$\overline{\alpha}_i^* = \frac{||\overline{\lambda}(i)||_1^{-1}}{\sum_{j=1}^{\eta} ||\overline{\lambda}(j)||_1^{-1}} \tag{12}$$

$$\underline{\alpha}_i^* = \frac{||\underline{\lambda}(i)||_1^{-1}}{\sum_{j=1}^{\eta} ||\underline{\lambda}(j)||_1^{-1}} \tag{13}$$

3.4 Algoritmo de predicción

En el instante de tiempo k, dado un vector $\tilde{x}_k$, las operaciones necesarias para obtener una predicción de la salida del sistema siguiendo la metodología presentada son

1. Componer los vectores $b_{L_R}(i)$, $b_{Y_R}(i)$ y las matrices $A_R(i)$ con $i = 1, ..., \eta$.
2. Calcular los vectores $\underline{\lambda}(i), \overline{\lambda}(i)$ mediante las expresiones (8) y (9).
3. Obtener los pesos $\underline{\alpha}_i, \overline{\alpha}_i$ mediante las expresiones (12) y (13).
4. Calcular la predicción intervalar $f_\lambda(\tilde{x}_k) = [\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k), \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k)]$ mediante las expresiones (4) y (5).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

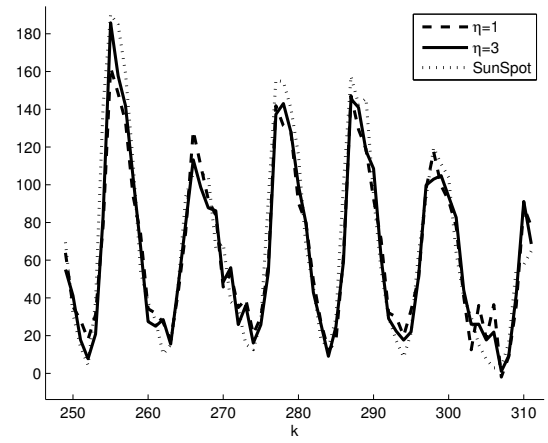


Figura 1: Predicciones centrales obtenidas.

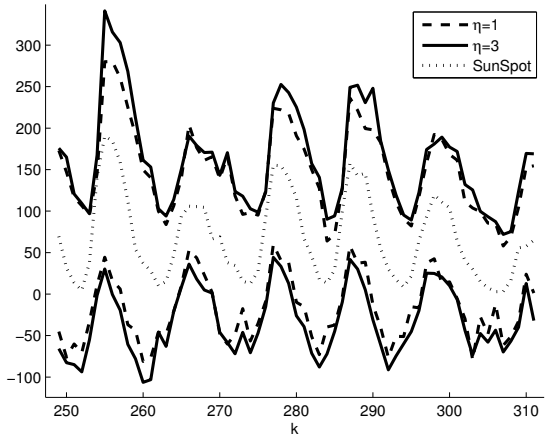


Figura 2: Predicciones intervalares obtenidas.

5. Obtener la predicción central $\bar{y}_k^c = \frac{1}{2}\left(\underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_k) + \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_k)\right)$

4 EJEMPLO

Con objeto de estudiar el rendimiento obtenido por el nuevo predictor se incluye esta sección de experimentación. Se ha considerado el problema de predecir una serie temporal denominada Sunspot Numbers. Esta serie temporal es interesante ya que es un ejemplo del mundo real, los datos son públicos y su predicción es relevante en muchos campos de aplicación. La serie está compuesta por 314 datos, desde el año 1700 hasta 2013 y reflejan el número de manchas solares presentes. Los primeros 248 datos se han utilizado para construir el conjunto $\mathcal{D}$. Los restantes 66 datos se han incluido en un conjunto de validación. Se ha considerado un predictor a un paso donde $\tilde{x}_k = [\tilde{y}_{k-1}\ \tilde{y}_{k-2}\ \tilde{y}_{k-3}]^T$. Como los datos pertenecen a una serie temporal, el término u_k no se utiliza. Como métricas para evaluar el rendimiento de la predicción central de los predictores considerados se utilizan la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y el máximo error en valor absoluto ($MAXE$). Se considera el índice INT, definido mediante

$$INT = \frac{1}{66}\sum_{i=249}^{314} \overline{f}_{\overline{\lambda}}(\tilde{x}_i) - \underline{f}_{\underline{\lambda}}(\tilde{x}_i)$$

para evaluar la predicción intervalar. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en el conjunto de evaluación. Se han utilizado los valores $\sigma = 54$ y $L = 0.03$ que proporcionan una acotación garantista del error. Es importante recordar que la particularización a $\eta = 1$ del predictor presentado en esta comunicación ya estaba presente en la literatura [6, 9] y constituye un método clásico de predicción basada en error acotado. El objetivo es mejorar el rendimiento de la predicción central de dicho caso. La tabla muestra que desde el punto de vista de las métricas $RMSE$ y $MAXE$ los predictores con $\eta = 2, 3, 4$ mejoran los resultados del predictor original con $\eta = 1$ (ver Figura 1). Así mismo, como era de esperar la métrica INT aumenta de valor, tal y como se puede apreciar en la figura 2. A tenor de los resultados obtenidos para este ejemplo, se puede decir que utilizar la predicción intervalar presentada en esta comunicación con $\eta > 1$ proporciona mejores resultados desde el punto de vista de la predicción central, aunque se pierde algo de precisión en la envoltura intervalar, con lo que se confirma la tesis en la que se ha basado el desarrollo del predictor.

Tabla 1: **Results obtained**

η	$RMSE$	$MAXE$	INT
1 [6]	18.6	63.5	166.1
2	16.9	61.3	181.1
3	16.2	58.6	194.6
4	18.5	63.9	206.4

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un nuevo método para obtener un predictor intervalar aplicable a sistemas dinámicos no necesariamente lineales. El predictor se construye utilizando técnicas no paramétricas basadas en error acotado. Por lo tanto, no se necesita asumir un modelo paramétrico del sistema ni tampoco propiedades estadísticas en el error presente en las medidas o el error de predicción. El predictor utiliza un conjunto de medidas de entrada y salida del sistema y un umbral máximo para el error en medida considerado. La principal novedad del método prop-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

uesto consiste en una modificación que permite disminuir el error cometido por la predicción central del intervalo obtenido. Esta mejora se obtiene incrementando el número de salidas almacenadas utilizadas para inferir la predicción intervalar. La bondad del método propuesto ha sido chequeada en un ejemplo con datos reales.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por DPI2012-33309 del MEC de España.

Referencias

[1] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.

[2] J. M. Bravo, T. Alamo, and E. F. Camacho. Bounded error identification of systems with time-varying parameters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51-7:1144 – 1150, 2006.

[3] V. Broman and M.J. Shensa. A compact algorithm for the intersection and approximation of n-dimensional polytopes. In *Proc. 12th IMACS world Congr. on Scientific Computation*, volume 2, pages 473–476, Paris, France, July 1988.

[4] E. Fogel and Y. F. Huang. On the value of information in system identification - bounded noise case. *Automatica*, 18:229–238, 1982.

[5] L. Ljung. *System Identification*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.

[6] M. Milanese and G. Belforte. Estimation theory and uncertainty intervals evaluation in presence of unknown but bounded error: linear families of models and estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27:408–414, 1982.

[7] M. Milanese, J. Norton, H. Piet-Lahanier, and E. Walter. *Bounding Approaches to System Identification*. Plenum Press, New York, 1996.

[8] M. Milanese and C. Novara. Set membership prediction of nonlinear time series. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11):1655–1669, 2005.

[9] M. Milanese and R. Tempo. Optimal algorithms theory for robust estimation and prediction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 30(8):730–738, 1985.

[10] S.H. Mo and J.P. Norton. Recursive parameter-bounding algorithms which compute polytope bounds. In *Proc. 12th IMACS world Congr. on Scientific Computation*, volume 2, pages 477–480, Paris, France, July 1988.

[11] A. Stenman, F. Gustafsson, and L. Ljung. Just in time models for dynamical system. In *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1115–1120, Kobe, Japan, 1996.

[12] A. Vicino and G. Zappa. Sequential aproximation of feasible parameter sets for identification with set membership uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(6):774–785, 1996.

[13] Q. Zheng and H. Kimura. Just-in-time modeling for function prediction and its applications. *Asian Journal of Control*, 3:35–44, 2001.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tool wear classification using texture descriptors based on Local Binary Pattern

Oscar García-Olalla, Enrique Alegre, Joaquín Barreiro, Laura Fernández-Robles, María Teresa García-Ordás
{ogaro, enrique.alegre, joaquin.barreiro, l.fernandez, mgaro}@unileon.es
University of León.

Abstract

A new approach for tool wear identification in metal milling is presented in this work. This approach evaluates two texture descriptors: LBP and ALBP, both combined with the LOSIB enhancer descriptor (Local Oriented Statistical Information Booster). Two datasets for tool wear are considered: the first one contains images of worn cutting edges in gray-scale (Cutting Edges dataset), the second one consists of the crops of the worn areas (Edge Wear dataset). Two different labelling approaches are applied in both datasets: one with three classes (low, medium and high wear) and another with two classes (low and high wear). The descriptors were classified using Support Vector Machine with Least Squares training method. In the Edge Wear dataset, our approach obtains 74.05% of hit rate using ALBP8 with LOSIB(1,8) for two classes and 53.77% for three classes in the labelling.

Keywords: LBP, texture description, LOSIB, tool wear, machining, monitoring.

1 INTRODUCTION

Development of on-line measurement systems to detect the wear level of metal cutting inserts is an issue of utmost importance for the control of automated production systems. These kind of monitoring systems help to reduce production costs, since supervision of an operator is no longer required. This subject becomes increasingly important in modern facilities where machining is performed at very high cutting speeds, which reduces tool life significantly. Consequently, the cost of tool replacement reduces the productivity in a very competitive industry. The last decade has witnessed a growing trend for extending production benefits associated to the use of cutting tools beyond their normal limits. Despite the many efforts focused on this issue, finding a satisfactory solution for on-line monitoring has not been yet achieved due to the great difficulties implied in tool wear measuring.

Metal machining operations such as turning, milling or drilling are processes involved in the manufacture of most of the goods. Although much research has been focused on acquiring advanced knowledge of the behaviour of these processes in the last decades, the complexity of this work in this field makes that this challenge is still alive nowadays [2]. One aspect can be highlighted in this context: the cost of cutting tools represents a significant portion of the final cost, especially in the context of unmanned production. Teti et al. [23] and Weckenmann et al. [26] reported that cost of cutting tools and their replacement account 3-12% percent of total production costs. So, it is clear that in the case of cutting tools, a considerable amount of money can be saved when increasing the efficiency of tool wear monitoring [12]. In addition, about 20% of non-productive time is due to tool failure [13] on modern machines. On-line monitoring of tool wear may improve the decision making process involved in tool replacement based on objective facts, instead of relying on operator's subjective criteria. In particular, important research has been focused in recent years on the use of different sensors for monitoring the condition of cutting tools. Some of the most recent works are [19, 24, 20, 5, 4, 6, 14, 21]. Use of wear sensors can reduce tool costs in 40% [15], a clear business opportunity.

It is very important, therefore, to develop precise and efficient methods to predict tool wear level, its evolution and its remaining cutting life. A machine control system should be able to provide optimized strategies for tool replacement and for adjusting tool correctors. In this field, the use of computer vision and texture analysis is of interest to determine the wear of cutting inserts.

Texture analysis is a challenging open problem in computer vision which refers to a set of processes applied to detect and describe spatial variations of the gray level of all the pixels in an image. Nowadays, there are multiple fields that profit from automatic texture retrieval, as it makes processes faster with no need of many qualified staff.

In the biological field, Alegre et al. [1] proposed a texture and moment-based classification

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

of the boar sperm acrosome integrity obtaining very promising results. González-Castro et al. [8] proposed an adaptive method with no need of training for texture classification based on the pattern spectrum descriptor. Other biological examples are, for instance, the method carried out by Zhou et al. [27] who used gray level co-occurrence features for breast cancer recognition, obtaining a precision of 69% using the Tamaura dataset or the experiment performed by Wang et al. [25] who developed a texture retrieval method of the Thyroid Gland SPECT images based on the gray level co-occurence matrix.

Haralick features, Wavelet transform and Local descriptors are very well known techniques with high performance in texture retrieval processes. Local descriptors have become more and more important in the last few years. In particular, the Local Binary Pattern (LBP) descriptor proposed by Ojala et al. [16] and all the derived methods have been widely used due to their simplicity and high capability to extract the intrinsic features from the textures. García-Olalla et al. [7] proposed an adaptive LBP method for vitality assessment of boar sperm. Guo et al. developed several modifications to LBP such as LBP variance (LBPV) [11], complete LBP (CLBP) [9] or adaptive LBP (ALBP) [10].

In fabric quality control processes several methods have been developed in the last years related to texture description and LBP. Dutta et al. [3] developed a technique based on the gray-level co-occurrence matrix to measure tool condition. In [22] a modified LBP variant is used to detect defects in fabrics achieving an acceptable rate of detection higher than 95%.

The aim of this paper is to estimate the wear of cutting inserts with enough precision using texture descriptors based on LBP, applied both to the complete cutting edge or just over the worn area. So that, decision making about the right time for tool replacement can be improved by means of objective reasons.

The rest of the paper is structured as follows. In section 2 the methodology is described. Experiments and datasets are shown in section 3. Finally, in section 4 conclusions are discussed.

2 METHODS

2.1 Local Binary Pattern

Local Binary Pattern (LBP) is an algorithm proposed by Ojala et al. [17] that describes the texture of gray-scale images extracting their local spatial structure. A pattern code is computed for each pixel of the image by comparing it with the gray-scale value of its neighbors following the equation (1).

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c)2^p$$
$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

where g_c is the value of the central pixel, g_p is the value of its neighbour p, P is the number of neighbours and R is the radius of the neighbourhood.

After LBP is obtained for each pixel, a histogram is built in order to describe the whole image using only the uniform patterns [18], yielding a feature vector of $P + 2$ bins of the image. The pattern extraction process for one pixel is shown in Figure 1.

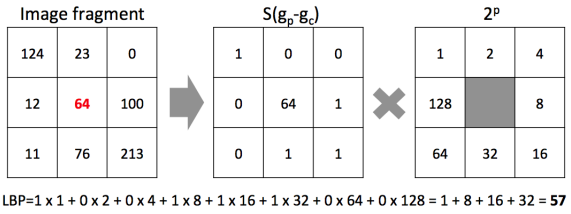


Figure 1: Local Binary Pattern process for one gray-scale pixel with P=8 and R=1. LBP code assigned to the central pixel is calculated by multiplying the output of the threshold function by the term 2^p for each neighbor pixel and then summing all these values.

2.2 Adaptive Local Binary Pattern

Guo et al. [10] proposed an adaptive descriptor based on Local Binary Pattern motivated by the lack of information about the orientation in the classical Local Binary Pattern algorithm. The method that they presented takes into account the mean and the standard deviation along different orientations over all the pixels in order to make the matching more robust against local spatial structure changes. To minimize variations of the mean and standard deviation of the directional differences, Guo et al. proposed a scheme to minimize the directional difference $|g_c - w_p * g_p|$ adding to equation (1) an extra parameter w.

The objective function is defined as follows:

$$w_p = arg_w \min \left\{ \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} |g_c(i,j) - w \cdot g_p(i,j)|^2 \right\} \quad (2)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

where w_p is the weight element used to minimize the directional difference and N and M are the number of rows and columns in the image, respectively. Each weight w_p is estimated along one orientation $2p\pi/P$ for the whole image.

Therefore, adding this extra parameter w the ALBP method can be defined as:

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - w_p \cdot g_c)2^p$$
$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 Local oriented statistical information booster (LOSIB)

The main goal of the Local Oriented Statistical Information Booster (LOSIB) is to enhance the performance of texture descriptors. The principal idea of LOSIB is to add local oriented statistical information computed along all pixels of the image. This information is rarely taken into account when describing textures and it gives very useful information about the image. In this work, the combination of LOSIB with local binary pattern modifications has been done by concatenating both vectors.

One important factor in LOSIB extraction is the number of neighbours in the neighbourhood. In this sense, more neighbours means that a higher number of different orientations are taken into account. If the texture is heterogeneous, the number of neighbours should be increased to capture as much as variety in the image as possible. However, on homogeneous textures the use of excessive orientations may cause loss of weight of the important ones.

Another important factor is the neighbourhood depth used to compute the statistical moments, since information retained by LOSIB at each pixel is less local. Depending on the image dataset, very local or more loose global information can achieve better performance. Nomenclature for this method is LOSIB(R,P) being R the radius of the neighbourhood and P the number of neighbours.

Let c be a pixel at position (x_c, y_c) of the image, p be a pixel of its neighbourhood (with $p \in \{0, 1, ..., (P-1)\}$) with (x_p, y_p) coordinates, and let g_c and g_p be their respective gray-level values.

The first step to obtain LOSIB is to extract the absolute differences d_p between the gray-level values g_c and g_p, for all pixels c of the image, as shown in equation (4). Figure 2 depicts an example of this oriented difference extraction at three pixels.

$$d_p(x_c, y_c) = |g_c - g_p| \quad (4)$$

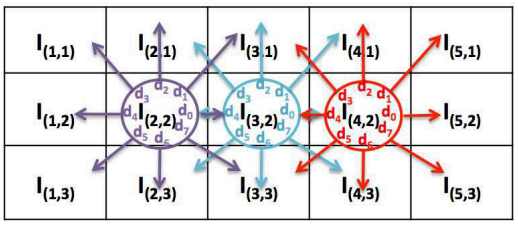


Figure 2: Extraction of the absolute difference of gray-level values for three pixels to compute LOSIB(1,8).

Given a pixel c, the coordinates (x_p, y_p) of its p-th neighbor are obtained by means of equation (5).

$$(x_p, y_p) = (x_c + R\cos(2\pi p/P),\ y_c - R\sin(2\pi p/P)) \quad (5)$$

Values of neighbours which are not in the grid center can be estimated by interpolating their connected pixels.

Then, the mean of all differences along the same orientation is computed following equation (6), where N and M are the number of rows and columns of the image, respectively.

$$\mu_p = \frac{\sum_{x_c=1}^{M} \sum_{y_c=1}^{N} d_p(x_c, y_c)}{M \cdot N} \quad (6)$$

At the end, all the mean values for each orientation yield to the LOSIB enhancer vector.

3 EXPERIMENTS AND RESULTS

3.1 Image acquisition

3.1.1 Central region elimination

The gray-scale images of the inserts with masked background are subjected to a pre-processing step which results in four new images, one for each cutting edge in horizontal position. The first step consists of removing the central portion of the insert, a circular masking region. Firstly, the center and radius of the circle are determined. To determine the circle center, the image is binarized with a threshold of 0.01, resulting in an image with insert pixels set to 1 and the rest to 0. Then, the centroid of the insert area is calculated and assigned as the circle center. Using this binarized image, the length of the major axis is also obtained. The circle radius is defined as 1/5 of the

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

major axis length. After this process, we obtain a gray-scale image of the insert with both its background and central region masked out. This image will be used to extract the four cutting edges.

3.1.2 Edge extraction

This section describes the edge extraction just only for the west edge. Rest of edges (north, east and south) are extracted applying the same procedure on 90, 180 and 270 rotated version of the original image, respectively. A vertical Sobel filter is applied to detect the inserts contours using the gray-scale image resulting from the previous step. These contours are then dilated and opened, and vertically projected on the horizontal axis. The first element non-equal to zero in this projection indicates the x coordinate of the image where the cutting edge starts. Then, from this starting x coordinate the image is cropped to a width of 100 pixels and the same height of the original image, so that it contains the cutting edge. A parametric margin is added to increase the cropped area, because experimental tests showed that some inserts lost some edge pixels due to a tight crop.

3.1.3 Rotation to horizontal position

Once the four cutting edges have been extracted and their crops have been rotated to horizontal position (edge facing to south), the edges need to be aligned to horizontal position. Due to inserts are not square-shaped but rhomboid-shaped instead, their cutting edges are not aligned within the same vertical and horizontal axis. Therefore, a rotation is required to align edge image with regard to the horizontal axis. To carry out this operation, a horizontal Sobel filter is applied followed by a dilation. The resulting image is filtered in order to remove smaller objects which results in a binary image containing just the cutting edge. This edge is inscribed in a ellipse whose major axis is obtained. The orientation of this major axis is the same as the orientation of the cutting edge with respect to the horizontal axis. Later, the original cutting edge image is rotated to compensate this orientation, obtaining cutting edges aligned to horizontal position and providing the Cutting Edges dataset. An example of four images of this dataset is shown in Figure 3.

3.1.4 Tool wear segmentation

In order to describe only the tool wear region of interest instead of all the insert area, a manual segmentation over the worn area was performed. These images were considered as a new dataset called Edge Wear dataset. An example is indicated in Figure 4 for the same images shown in

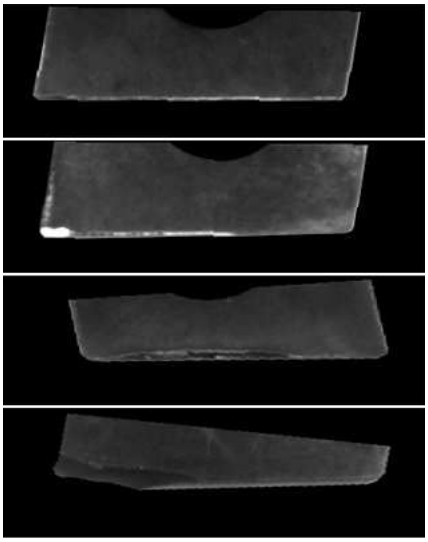


Figure 3: Example of 4 of the 212 images belonging to the Cutting Edge dataset.

Figure 3.

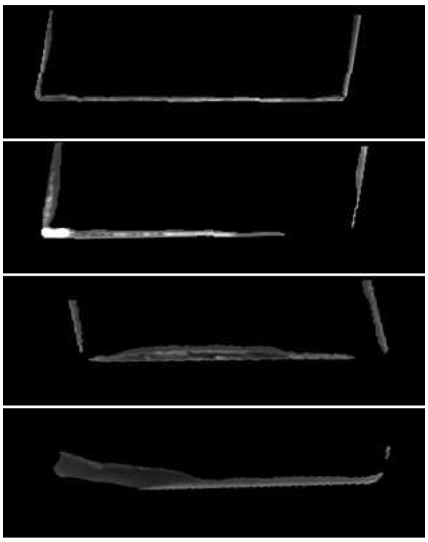


Figure 4: Example of 4 of the 212 images belonging to the Edge Wear dataset.

3.2 Setup

To avoid biased results due to the random factor, a cross validation algorithm was implemented using kFold. First, all the descriptors were divided into ten subsets randomly, assigning to each descriptor an index between 1 and 10. Then, four Support Vector Machine (SVM) models were trained with Least Squares (LS) training algorithm. Nine of the subsets were used for training whereas the last subset was reserved to test the classifier.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.3 Results

3.3.1 Classification as low-medium-high wear

This section analyses the results when using a labelling with three levels of wear (low-medium-high). The best results were obtained using ALBP with LOSIB, both of them with 8 neighbours and radius 1. For this case the hit rate was 53.77% using the Edge Wear dataset. Although these results are quite low, they are helpful to demonstrate the advantages of using LOSIB booster, which improves the original results in all the evaluated cases. Results are shown graphically in Figure 5. Moreover, the Edge Wear dataset obtains in all cases better results than the Cutting Edge dataset due to the focus in the edge wear region. Another important fact is the better performance of the methods with 8 neighbours and radius 1 caused by the narrowness of the edge wear and the prevalence of homogeneous areas in the insert.

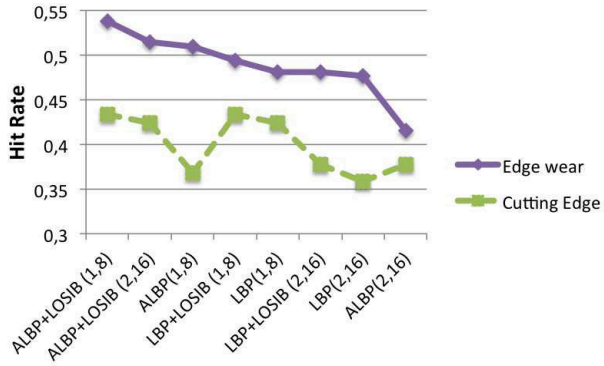


Figure 5: Results using low-medium-high classification over both datasets.

3.3.2 Classification as low-high wear

The results obtained using a binary classification are better than those obtained in a three class classification. In order to perform this experiment, the low and medium classes were merged into only one class called simply low, while the high class was kept the same. Figure 6 shows the results. The best performance was achieved using ALBP with LOSIB with 8 neighbours and the Edge Wear dataset, as in the previous experiment with three classes. However, in this case hit rate increases up to 74.04%, which improves in 38.37% the three classes results with the same configuration.

4 CONCLUSIONS

A new method has been presented to determine the wear level of metal cutting tools in milling.

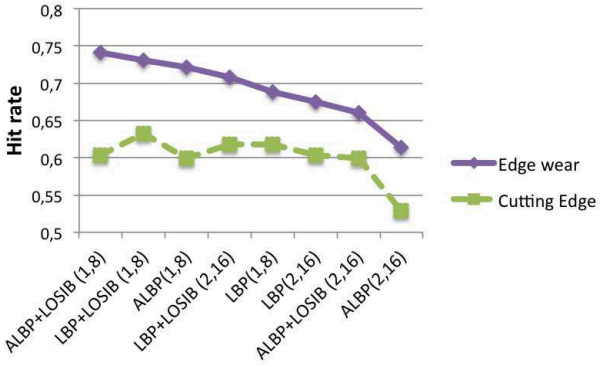


Figure 6: Results using the low-high classification over both dataset.

The final goal is to implement a monitoring system for unmanned machining facilities so that tool life can be safely enlarged. The method is based on computer vision techniques using texture descriptors. Two types of dataset were used following two different strategies. The first approach consisted on a ternary classification with low, medium or high wear labels. The second strategy was a binary classification between low and high wear labels. In a first phase, complete edges were used to describe their texture using ALBP, LBP combined with LOSIB and using different neighbourhood configuration. The best results were obtained using the binary classification with LBP and LOSIB(1,8) achieving a 63.21% of hit rate. For the ternary classification the best result was 43.40% of hit rate using ALBP with LOSIB(1,8). In a second phase, texture methods evaluation was done using the Edge Wear dataset, that is, focusing only on the worn region. Best results here were achieved in the ternary classification with a 53.77% of hit rate, which outperforms the first phase results with the complete edge in 23.89%. In the binary classification hit rate was 74.06% using ALBP with LOSIB(1,8), that is, a 22.65% of improvement with regard to the first phase.

Acknowledgements

This work has been supported by DPI2012-36166 grant and the pre-doctoral FPU fellowship program supported by the Spanish Government (AP2010-0947).

References

[1] E. Alegre, V. González-Castro, R. Aláiz-Rodríguez, and M.T. García-Ordás. Texture and moments-based classification of the acrosome integrity of boar spermatozoa images. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[2] M.S.H. Bhuiyan and I.A. Choudhury. Review of sensor applications in tool condition monitoring in machining. *Comprehensive Materials Processing*, 13:539–569, 2014.

[3] S. Dutta, A. Datta, N. Das Chakladar, S.K. Pal, S. Mukhopadhyay, and R. Sen. Detection of tool condition from the turned surface images using an accurate grey level cooccurrence technique. *Precision Engineering*, 36(3):458 – 466, 2012.

[4] R. Fayad. Tool monitoring for drilling process applying enhanced neural networks. In *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, February 26-28th 2010.

[5] A.I. Fernández-Abia, J. Barreiro, L.N. López de Lacalle, and D. González-Madruga. Effect of mechanical pre-treatments in the behaviour of nanostructured pvd-coated tools in turning. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, On-line acess, 2014.

[6] H. Gao, D. Li, M. Xu, M. Zhao, X. Shi, and HF. Huang. Tool wear monitoring based on novel evolutionary artificial neural networks. In *Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC)*, August 10-12th 2010.

[7] O. Garcia-Olalla, E. Alegre, L. Fernandez-Robles, and M.T. García-Ordás. Vitality assessment of boar sperm using an adaptive lbp based on oriented deviation. In *Asian conference in computer vision. Local binary Pattern Workshop*, 2012.

[8] Victor Gonzalez-Castro, Enrique Alegre, Oscar Garcia-Olalla, Laura Fernandez-Robles, and Maria Teresa Garcia-Ordas. Adaptive pattern spectrum image description using euclidean and geodesic distance without training for texture classification. *IET Computer Vision*, 2012.

[9] Z. Guo, L. Zhang, and D. Zhang. A completed modeling of local binary pattern operator for texture classification. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 19(6):1657–1663, 2010.

[10] Z. Guo, L. Zhang, D. Zhang, and S. Zhang. Rotation invariant texture classification using adaptive lbp with directional statistical features. In *Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on*, pages 285 –288, sept. 2010.

[11] Z. Guo, L. Zhang, D. Zhang, and S. Zhang. Rotation invariant texture classification using lbp variance (lbpv) with global matching. *Pattern Recognition*, 43(3):706–719, 2010.

[12] J. Kopac. Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life. *Journal of Materials Processing Technology*, 78(1-3):95 – 103, 1998.

[13] S. Kurada and C. Bradley. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, 34(1):55 – 72, 1997.

[14] W. Li, P. Fu, and W. Cao. Tool wear states recognition based on genetic algorithm and back propagation neural network model. In *International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, October 22-24th 2010.

[15] G.H. Lim. Tool-wear monitoring in machine turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 51(1-4):25 – 36, 1995.

[16] T. Ojala, M. Pietikainen, and D. Harwood. Performance evaluation of texture measures with classification based on kullback discrimination of distributions. In *Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition (ICPR 1994)*, 1994.

[17] T. Ojala, M. Pietikainen, and D. Harwood. A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions. *Pattern Recognition*, 29(1):51 – 59, 1996.

[18] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with Local Binary Patterns. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(7):971–987, 2002.

[19] S. Painuli, M. Elangovan, and V. Sugumarana. Tool condition monitoring using k-star algorithm. *Expert Systems with Applications*, 41:2638–2643, 2014.

[20] M. Pratama, M.J. Er, X. Li, O.P. Gan, R.J. Oentaryo, S. Linn, L. Zhai, and I. Arifin. Tool wear prediction using evolutionary dynamic fuzzy neural (edfnn) network. 7-10 nov. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON*, 2011.

[21] Y. Qian, J. Tian, L. Liu, Y. Zhang, and Y. Chen. A tool wear predictive model based on svm. In *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 26-28th 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[22] F. Tajeripour, E. Kabir, and A. Sheikhi. Defect detection in patterned fabrics using modified local binary patterns. In *Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2007. International Conference on*, volume 2, pages 261–267. IEEE, 2007.

[23] R. Teti. Machining of composite materials. {*CIRP*} *Annals - Manufacturing Technology*, 51(2):611 – 634, 2002.

[24] G.F. Wang, Y.W. Yang, Y.C. Zhang, and Q.L. Xie. Vibration sensor based tool condition monitoring using support vector machine and locality preserving projection. *Sensors and Actuators A:Physical*, 209:24–32, 2014.

[25] X. Wang, J. He, and Z. Lv. Texture-based retrieval of thyroid gland spect image. In *Biomedical Engineering and Informatics, 2009. BMEI '09. 2nd International Conference on*, pages 1–5, 2009.

[26] A. Weckenmann and K. Nalbantic. Precision measurement of cutting tools with two matched optical 3d-sensors. {*CIRP*} *Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):443 – 446, 2003.

[27] J. Zhou, C. Feng, X. Liu, and J. Tang. A texture features based medical image retrieval system for breast cancer. In *Computing and Convergence Technology (ICCCT), 2012 7th International Conference on*, pages 1010–1015, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Mejora de la Estabilidad en Sistemas Takagi-Sugeno mediante la aplicación del Teorema de Polya con multiíndices

Andrés Querol Carlos V. Ariño
andres.querol@uji.es arino@uji.es

Manuel A. Hernández-Mejías Antonio Sala
maher3@upv.es asala@isa.upv.es

Resumen

El presente trabajo se basa en explotar la estructura inherente de los modelos Takagi-Sugeno obtenidos mediante la metodología de sector no-lineal [1], de forma que se pueden obtener unas condiciones de estabilidad menos conservativas que las obtenidas para un modelo Takagi-Sugeno genérico [2]. Esto se debe a que parte de la información del modelado de estos sistemas se suele perder al realizar el estudio de estabilidad, tal y como se planteó en [3]. El presente trabajo amplia el resultado citado obteniendo condiciones asintóticamente exactas mediante el empleo del teorema de Polya.

Palabras clave: Fuzzy control; Linear matrix inequalities; Relaxed quadratic stabilisation; Stability

1. Introdución

Actualmente sistemas borrosos Takagi-Sugeno (TS) son ampliamente utilizados para modelar localmente procesos no lineales. Esto se debe a que existe una metodología sistemática de hacerlo usualmente descrita como sector no-lineal [1]. Mediante dicha técnica se obtienen modelos TS del sistema no lineal validos en una región de interés compacta. Este tipo de modelado se basa en utilizar aproximadores borrosos para cada función no-lineal del sistema, estos aproximadores son interpolaciones entre un valor máximo y mínimo en la región de interés. Posteriormente se definen los modelos locales del sistema los cuales están asociados a una selección de valores máximos y mínimos de dichas funciones.

Los sistemas TS obtenidos mediante esta técnica o técnicas similares, consisten en la interpolación de modelos locales [1]. La validez de dichos modelos viene dada por un conjunto de reglas cada una de las cuales depende de una o varias funciones de pertenencia, μ_{ij}, que evalúan el grado de cumplimiento de la regla. Si cada modelo depende de varias funciones de pertenencia se tiene que realizar el producto de ellas para obtener la interpolación final.

En la mayoría de los trabajos previos, se ha omitido la relación de los modelos locales con el producto de las funciones de pertenencia μ_{ij}. Y se tiene en cuenta una única función de pertenencia para cada uno de los modelos locales. Ambas descripciones del sistema son totalmente equivalentes, la segunda simplifica el diseño de controladores mediante LMI, pero se pierde información de la estructura del modelo esto lleva al diseño de controladores conservativos. Este fenómeno ya se estudió ampliamente en [3], donde se muestra que se pueden conseguir mejores diseños de controladores manteniendo la estructura de los productos en las funciones de pertenencia μ_{ij}. Actualmente, se ha observado que las condiciones de estabilidad presentadas eran conservativas, es decir, suficientes pero no necesarias. Esto ha llevado a pensar, tal y como se ha hecho para otro tipo de modelos [2], que se puede llegar a obtener condiciones de estabilidad asintóticamente necesarias además de suficientes.

La estructura del articulo es la siguiente:

- **Preliminares**: En este apartado se detallan los conocimientos previos en que se basan las aportaciones realizadas en el presente artículo. Es decir, se expondrán las condiciones de estabilidad y de relajación basadas en el teorema de Polya.

- **Notación y Aportaciones**: Aquí se expone la notación que se va a utilizar en el actual trabajo, además de las aportaciones realizadas para poder computar los nuevos criterios de relajación, también basados en el teorema de Polya.

- **Ejemplo**: Apartado donde se dispone de un ejemplo, en el cual se detalla y compara, la capacidad y la mejora obtenida por las metodologías basada en Polya, ya sea Clásico o con Multiíndices.

- **Conclusiones**: Donde se analizan y discuten los resultados obtenidos en el actual trabajo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2. Preliminares

Como se ha indicado anteriormente, un sistema TS consiste básicamente en modelos vinculados a un conjunto de reglas, tal y como puede verse en la expresión siguiente:

$$\begin{array}{l}\textbf{SI} \quad \mu_{1,i_1}(z_1(t)) \quad y \ldots y \quad \mu_{p,i_p}(z_p(t)) \\ \textbf{ENTONCES} \left\{ \begin{array}{c} \dot{x}(t) = A_{\mathbf{i}}x(t) + B_{\mathbf{i}}u(t) \\ y(t) = C_{\mathbf{i}}x(t) \end{array} \right. \end{array} \tag{1}$$

donde $\mathbf{i} = (i_1, i_2, \ldots, i_p)$.

Generalmente, se simplifica la notación anterior de forma que el vector de índices $\mathbf{i}$ se trata como un único índice. En este trabajo no se va a realizar dicha simplificación, ya que se va a utilizar la información de dichos índices en el desarrollo de las nuevas condiciones de estabilidad. De esta forma, el sistema borroso se escribe como:

$$\dot{x} = \sum_{i_1=1}^{r_1} \cdots \sum_{i_p=1}^{r_p} \mu_{1,i_1} \ldots \mu_{p,i_p}(A_{\mathbf{i}}x + B_{\mathbf{i}}u) \quad \mathbf{i} = (i_1, i_2, \ldots, i_p) \tag{2}$$

Por brevedad, se define $\mu_{\mathbf{i}} = \mu_{1,i_1} \ldots \mu_{p,i_p}$ y $\sum_{\mathbf{i}\in\mathbb{I}} = \sum_{i_1=1}^{r_1} \cdots \sum_{i_p=1}^{r_p}$ donde $\mathbb{I}$ denota el conjunto de todos los posibles valores de $\mathbf{i}$.

En este artículo, planteamos un procedimiento de diseño de controladores estables tipo PDC (Controlador distribuido en paralelo) [1], el cual define la acción de control como:

$$u = \sum_{\mathbf{i}\in\mathbb{I}} \mu_{\mathbf{i}} F_{\mathbf{i}} x \tag{3}$$

Por tanto, el comportamiento del sistema en bucle cerrado puede representarse con un doble sumatorio, tal y como se expone en la siguiente expresión:

$$\dot{x} = \sum_{\mathbf{i}\in\mathbb{I}} \sum_{\mathbf{j}\in\mathbb{I}} \mu_{\mathbf{i}}\mu_{\mathbf{j}}(A_{\mathbf{i}} + B_{\mathbf{i}}F_{\mathbf{j}})x \tag{4}$$

$$\mathbf{i} = (i_1, i_2, \ldots, i_p) \quad \mathbf{j} = (j_1, j_2, \ldots, j_p) \tag{5}$$

$$\mu_{\mathbf{i}} = \mu_{1,i_1}, \ldots, \mu_{p,i_p} \tag{6}$$

El estudio de la estabilidad y el problema de estabilización de los sistemas TS, ha sido ampliamente abordado a lo largo de la última década por diversos autores [1][4][5][6], y más recientemente por [7]. Como resultado intermedio, se puede decir, que para probar estabilidad, estabilización, o un conjunto de prestaciones tales ya sean el decrecimiento o rechazo ante perturbaciones, es suficiente con testear si un polinomio matricial de segundo orden formado por las funciones de pertenencia, es definido negativo.

$$\sum_{\mathbf{i}} \sum_{\mathbf{j}} \mu_{\mathbf{i}}\mu_{\mathbf{j}} x^T Q_{\mathbf{ij}} x < 0, \quad \forall x \neq 0 \tag{7}$$

Generalmente, este problema es abordado de forma simplificada, ya que se presupone que dado $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ y $\mathbf{l}$ entonces $\mu_{\mathbf{i}}\mu_{\mathbf{j}} \neq \mu_{\mathbf{k}}\mu_{\mathbf{l}}$, lo cual no siempre es cierto, tal y como se puede observar a continuación:

$$\mu_{(1,1)} = \mu_{11}\mu_{21}, \quad \mu_{(2,2)} = \mu_{12}\mu_{22},$$

$$\mu_{(1,2)} = \mu_{11}\mu_{22}, \quad \mu_{(2,1)} = \mu_{12}\mu_{21}$$

Puede observarse que $\mu_{(1,1)}\mu_{(2,2)} = \mu_{(1,2)}\mu_{(2,1)}$, esta idea fue desarrollada por [3], donde se obtienen las condiciones de estabilidad teniendo en cuenta estas mismas igualdades. El problema de las condiciones obtenidas en dicho trabajo es que no son asintóticamente exactas, como sí lo son las condiciones que se obtienen para modelos TS que no tienen esta estructura tensorial [2]. Así pues, en el presente trabajo se va a emplear ambas ideas, para presentar unas condiciones asintóticamente exactas para cualquier tipo de modelos TS.

A continuación, se presenta el resultado de [2] para mostrar como se lleva a cabo tal relajación. En [2] y [8], se indica que es posible aplicar el teorema de Polya para la relajación de inecuaciones con la siguiente estructura:

$$\sum_{i} \sum_{j} \mu_i\mu_j x^T Q_{ij} x < 0, \quad \forall x \neq 0 \tag{8}$$

Cumpliendo que las funciones de pertenencia μ_i están dentro del simplex: $\mu_i > 0$, $\sum_i \mu_i = 1$.

Con lo cual, la ecuación (8) puede expresarse como:

$$\left(\sum_{l=1}^{r} \mu_l\right)^{d-2} \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \mu_i\mu_j x^T Q_{ij} x < 0 \tag{9}$$

$$\sum_{i_1=1}^{r} \sum_{i_2=1}^{r} \cdots \sum_{i_d=1}^{r} \mu_{i_1}\mu_{i_2} \ldots \mu_{i_d} x^T Q_{i_1 i_2} x < 0, \quad \forall x \neq 0 \tag{10}$$

Expresión que puede ser dispuesta como se expone en (13), realizando un cambio de notación, tal como se explica en las siguientes líneas:

$$\mathbb{I}_{d,r} = \{\mathbf{i} = (i_1, i_2, \ldots, i_{d+2}) \in \mathbb{N}^p | 1 \leq i_j \leq r \quad \forall j = 1, \ldots, d\} \tag{11}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

otra forma de referirse al elemento k del índice $\mathbf{i}$ será $\mathbf{i}(k) = i_k$.

$$\mathbb{I}^+_{d,r} = \{\mathbf{i} \in \mathbb{I}_{d,r} | i_k \leq i_{k+1}, \quad k = 1, \ldots, d-1\} \quad (12)$$

Como puede observarse, $\mathbb{I}^+_{d,r}$ contiene todos los índices de los monomios diferentes del polinomio (10), con lo cual, este mismo polinomio puede representarse en función únicamente de dichos monomios como:

$$\sum_{\mathbf{i} \in \mathbb{I}_{d,r}} \mu_{\mathbf{i}} x^T Q_{\mathbf{i}} x = \sum_{\mathbf{i} \in \mathbb{I}^+_{d,r}} \mu_{\mathbf{i}} x^T \widetilde{Q}_{\mathbf{i}} x < 0, \quad \forall x \neq 0 \quad (13)$$

Donde $Q_{\mathbf{i}} = Q_{i_1, i_2}$.

Indicar también, que los valores de los coeficientes del polinomio $\widetilde{Q}_{\mathbf{i}}$ se obtienen directamente siguiendo (14), tal y como se detalla en [2].

$$\widetilde{Q}_{\mathbf{i}} = \sum_{\mathbf{j} \in \mathcal{P}(\mathbf{i})} Q_{\mathbf{j}} \quad \mathbf{i} \in \mathbb{I}^+_{d,r} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que $\mathcal{P}(\mathbf{i})$ denota todas las permutaciones del vector $\mathbf{i}$.

3. Notación y Aportaciones

En este apartado, se desarrolla la notación que se va a emplear para realizar la relajación de las inecuaciones mediante el teorema de Polya [2].

La notación utilizada en (7) es similar a la empleada en [1], la cual consiste en organizar los índices por reglas, pero a la hora de aplicar Polya [2], es decir, agrupar el polinomio (7) por sus coeficientes, resulta complejo trabajar con ella. Este problema, hace que resulte interesante crear una notación que agrupe los antecedentes de cada regla, de forma que así se facilite el trabajo de realizar la agrupación de coeficientes.

Se define, por tanto, $Q_{\bar{\mathbf{i}}}$, de forma que sea equivalente a $Q_{\mathbf{i},\mathbf{j}}$ definido en (7). Tal y como se indica en el siguiente ejemplo:

$$Q_{\mathbf{ij}} = Q_{(i_1, i_2, \ldots, i_p), (j_1, j_2, \ldots, j_p)} \quad (15)$$

$$Q_{\bar{\mathbf{i}}} = Q_{(i_1, j_1), \ldots, (i_p, j_p)} \quad (16)$$

Para poder recorrer todos los posibles valores de $Q_{\bar{\mathbf{i}}}$ se define el siguiente conjunto:

$$\mathbb{D}_{p,d} = \{\bar{\mathbf{i}} = (\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \ldots, \mathbf{i}_k, \ldots, \mathbf{i}_p) \\ | \mathbf{i}_k \in \mathbb{I}_{d,r_k} \forall k = 1, 2, \ldots, p\} \quad (17)$$

Teniendo en cuenta la reorganización de los índices expuesta en (15) y (16), así como la definición del conjunto (17), se pueden representar las condiciones de estabilidad (7) para el sistema (4) como:

$$\Xi(t) = \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,2}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} x^T Q_{\bar{\mathbf{i}}} x \quad (18)$$

Cumpliendo que las funciones de pertenencia $\mu_{\bar{\mathbf{i}}} > 0$ y que $\sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} = 1$. De esta forma, análogamente a lo realizado en (9), es posible multiplicar las condiciones (18) por $(\sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{j}}})^{d-2} = 1$.

$$\Xi(t) = \left(\sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{j}}} \right)^{d-2} \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,2}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} x^T Q_{\bar{\mathbf{i}}} x \quad (19)$$

$$\Xi(t) = \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,d}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} x^T Q_{\bar{\mathbf{i}}} x \quad (20)$$

En este momento aparece, al igual que en (13), un polinomio definido por las funciones de pertenencia que se puede representar como la suma de monomios:

$$\sum_{\mathbf{i} \in \mathbb{D}_{p,d}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} Q_{\mathbf{i}} = \sum_{\mathbf{i} \in \mathbb{D}^+_{p,d}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} \widetilde{Q}_{\mathbf{i}} \quad (21)$$

El conjunto $\mathbb{D}^+_{p,d}$ está definido en (22), de tal forma que no se repiten monomios de las funciones de pertenencia en el sumatorio.

$$\mathbb{D}^+_{p,d} = \{\bar{\mathbf{i}} = (\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \ldots, \mathbf{i}_k, \ldots, \mathbf{i}_p) \\ | \mathbf{i}_k \in \mathbb{I}^+_{d,r_k} \forall k = 1, 2, \ldots, p\} \quad (22)$$

Claramente, dado que el valor de todos los monomios $\mu_{\bar{\mathbf{i}}}$ es positivo, el polinomio es negativo si todos los coeficientes $\widetilde{Q}_{\mathbf{i}}$ también lo son. Esta condición, es claramente una condición suficiente pero no necesaria. El teorema de Polya demuestra que, conforme se aumenta el valor de d dicha condición es cada vez más necesaria, y cuando d tiende a infinito, dichos coeficientes tienen que ser necesariamente negativos.

Estos coeficientes se obtienen agrupando todos los productos de $\mu_{\bar{\mathbf{i}}}$ iguales, como se expone en la siguiente expresión, donde $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}}$ será[1]:

[1] Considerando [9], se observa que se puede plantear también $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}} = \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}})} Q_{\bar{\mathbf{j}}} \leq \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}})} X_{\bar{\mathbf{j}}} \quad \bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}^+_{p,d}$ con $X_{\bar{\mathbf{j}}} < 0$, definiendo apropiadamente $Y = \{X_{\bar{\mathbf{j}}}\}$ simétrica y definida negativa.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}} = \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}})} Q_{\bar{\mathbf{j}}} \quad \bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}^{+}_{p,d} \tag{23}$$

Definiendo $\overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}})$ como todas las permutaciones posibles de cada uno de los subíndices $\mathbf{i}_k$ de $\bar{\mathbf{i}}$

$$\overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}}) = \{\bar{\mathbf{j}} \quad | \quad \mathbf{j}_k \in \mathcal{P}(\mathbf{i}_k), \quad k = 1 \dots p\} \tag{24}$$

Como se observa, la obtención eficiente de los coeficientes del polinomio (21), no es un problema sencillo. Para poder simplificar ese problema, se va a tener en cuenta que $Q_{\bar{\mathbf{i}}} = Q_{(i_{1_1}, i_{1_2}, \dots, i_{1_d}) \dots (i_{p_1}, i_{p_2}, \dots, i_{p_d})}$ únicamente depende de los dos primeros índices de cada dimensión de $\bar{\mathbf{i}}$, es decir: $Q_{\bar{\mathbf{i}}} = Q_{(i_{1_1}, i_{1_2}) \dots (i_{p_1}, i_{p_2})}$. Esta consideración nos muestra que muchos de los coeficientes del polinomio son repetidos, con lo cual, no hay necesidad de realizar la suma sobre $\overline{\mathcal{P}}(\bar{\mathbf{i}})$, tal y como se ha definido en (24) para obtener $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}}$.

De hecho, es posible expresar $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}} = \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \mathbb{D}_{p,2}} C_{\bar{\mathbf{i}}}(\bar{\mathbf{j}}) Q_{\bar{\mathbf{j}}}$, donde $C_{\bar{\mathbf{i}}}$ es el número de veces que aparece el elemento $Q_{\bar{\mathbf{j}}}$ en el sumatorio. Este valor puede calcularse como el número de permutaciones del índice $\bar{\mathbf{i}}$ una vez se han eliminado los valores de $\bar{\mathbf{j}}$. Puede ocurrir que dichos valores de $\bar{\mathbf{j}}$ no aparezcan en $\bar{\mathbf{i}}$, en ese caso el valor de $C_{\bar{\mathbf{i}}}(\bar{\mathbf{j}})$ es 0. Por ejemplo, para los índices $\bar{\mathbf{i}} = (1,1,1,2)(1,1,2,2)$ y $\bar{\mathbf{j}} = (1,2)(1,2)$, el índice formado por la nombrada eliminación de valores sería $\bar{\mathbf{i}} - \bar{\mathbf{j}} = (1,1)(1,2)$. Para calcular el número de veces que aparece este valor en el sumatorio, se calcula el número permutaciones posibles de cada elemento y se multiplica. Se observa que, para $(1,1)$ hay una única permutación y para $(1,2)$ existen dos permutaciones posibles. Por tanto, se concluye que $C_{(1,1,1,2)(1,1,2,2)}((1,1)(1,2)) = 2$.

Para obtener de forma sistemática el valor de $C_{\bar{\mathbf{i}}}(\bar{\mathbf{j}})$ se puede utilizar la siguiente expresión combinatoria:

$$C_{\mathbf{i}_1, \dots, \mathbf{i}_p}(\mathbf{j}_1, \dots, \mathbf{j}_p) = \prod_{k=1}^{p} \frac{(d-2)!}{M(\mathbf{i}_k, \mathbf{j}_k)} \tag{25}$$

siendo

$$M(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = \prod_{l \in \mathbf{i}} (m(\mathbf{i}, l) - m(\mathbf{j}, l))! \tag{26}$$

Donde la función $m(\mathbf{i}, l)$ representa la multiplicidad de un escalar l en el vector $\mathbf{i}$, es decir si $\mathbf{i} = (1,1,2,3)$ entones $m(\mathbf{i}, 1) = 2$, $m(\mathbf{i}, 2) = 1$ y $m(\mathbf{i}, 3) = 1$.

Ejemplos

Se plantea el ejemplo de un sistema con dos funciones de pertenencia y dos antecedentes, con la actual notación se escriben las ecuaciones del sistema como:

$$\dot{x} = \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} (A_{\bar{\mathbf{i}}} x + B_{\bar{\mathbf{i}}} u) \tag{27}$$

siendo $A_{\bar{\mathbf{i}}} = A_{\mathbf{i}_1(1), \mathbf{i}_1(1), \dots, \mathbf{i}_p(1)}$, $B_{\bar{\mathbf{i}}} = B_{\mathbf{i}_1(1), \mathbf{i}_1(1), \dots, \mathbf{i}_p(1)}$ y $\mu_{\bar{\mathbf{i}}} = \mu_{\mathbf{i}_1(1)} \mu_{\mathbf{i}_1(1)} \cdots \mu_{\mathbf{i}_p(1)}$ y el sistema se controla en bucle cerrado mediante un PDC: $u = \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{j}}} F_{\bar{\mathbf{j}}} x$

$$\dot{x} = \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} (A_{\bar{\mathbf{i}}} x + B_{\bar{\mathbf{i}}} \sum_{\bar{\mathbf{j}} \in \mathbb{D}_{p,1}} \mu_{\bar{\mathbf{j}}} F_{\bar{\mathbf{j}}} x) \tag{28}$$

se pueden agrupar los indices $\bar{\mathbf{i}}$ y $\bar{\mathbf{j}}$ en un nuevo índice en el conjunto $\mathbb{D}_{p,2}$

$$\dot{x} = \sum_{\bar{\mathbf{i}} \in \mathbb{D}_{p,2}} \mu_{\bar{\mathbf{i}}} (A_{\bar{\mathbf{i}}(1)} + B_{\bar{\mathbf{i}}(1)} F_{\bar{\mathbf{i}}(2)}) x \tag{29}$$

donde $\bar{\mathbf{i}}(1) = (\mathbf{i}_1(1), \dots, \mathbf{i}_p(1))$

Si se quiere asegurar estabilidad de Lyapunov de este sistema, hay que comprobar que para una P definida positiva, se cumple que:

$$x^T P \dot{x} + \dot{x}^T P x < \quad 0 \tag{30}$$

$$Q_{\bar{\mathbf{i}}} < \quad 0 \tag{31}$$

donde $Q_{\bar{\mathbf{i}}}$ se define como:

$$Q_{\bar{\mathbf{i}}} = -Z A_{\bar{\mathbf{i}}(1)} - A^T_{\bar{\mathbf{i}}(1)} Z + B_{\bar{\mathbf{i}}(1)} N_{\bar{\mathbf{i}}(2)} + N^T_{\bar{\mathbf{i}}(2)} B^T_{\bar{\mathbf{i}}(1)} \tag{32}$$

$$Z > 0 \tag{33}$$

$$N_{\bar{\mathbf{i}}(2)} = F_{\bar{\mathbf{i}}(2)} Z^{-1} \tag{34}$$

Si no se realiza la expansión del sumatorio ($d = 2$), para un sistema con tres funciones de pertenencia y dos antecedentes cada una de ellas, ocurre que los coeficientes $Q_{\bar{\mathbf{i}}}$ que forman $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}}$ obtenidos para el caso de $\bar{\mathbf{i}} = (1,2)(1,2)(1,2)$ son:

$$\begin{aligned} \widetilde{Q}_{(1,2)(1,2)(1,2)} = {} & Q_{(1,2)(1,2)(1,2)} + Q_{(1,2)(1,2)(2,1)} \\ & + Q_{(1,2)(2,1)(1,2)} + Q_{(1,2)(2,1)(2,1)} \\ & + Q_{(2,1)(1,2)(1,2)} + Q_{(2,1)(1,2)(2,1)} \\ & + Q_{(2,1)(2,1)(1,2)} + Q_{(2,1)(2,1)(2,1)} \end{aligned} \tag{35}$$

Siguiendo con lo planteado anteriormente, puede verse que pasa si se expande el sumatorio hasta $d = 4$, para un sistema de dos funciones de pertenencia y dos antecedentes cada una de ellas. Los coeficientes $Q_{\bar{\mathbf{i}}}$ pertenecientes a $\widetilde{Q}_{\bar{\mathbf{i}}}$ que se obtienen para el caso de $\bar{\mathbf{i}} = (1,1,1,2)(1,1,1,2)$ serán:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\begin{aligned}
&\widetilde{Q}_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)} = \\
&C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(1,1))Q_{(1,1)(1,1)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(1,2))Q_{(1,1)(1,2)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(2,1))Q_{(1,1)(2,1)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(1,1))Q_{(1,2)(1,1)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(1,2))Q_{(1,2)(1,2)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(2,1))Q_{(1,2)(2,1)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(1,1))Q_{(2,1)(1,1)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(1,2))Q_{(2,1)(1,2)} \\
&+ C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(2,1))Q_{(2,1)(2,1)}
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(1,1)) &= \frac{2!}{1!1!}\frac{2!}{1!1!} = 4 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(1,2)) &= \frac{2!}{1!1!}\frac{2!}{2!0!} = 2 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,1)(2,1)) &= \frac{2!}{1!1!}\frac{2!}{2!0!} = 2 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(1,1)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{1!1!} = 2 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(1,2)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{2!0!} = 1 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((1,2)(2,1)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{2!0!} = 1 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(1,1)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{1!1!} = 2 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(1,2)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{2!0!} = 1 \\
C_{(1,1,1,2)(1,1,1,2)}((2,1)(2,1)) &= \frac{2!}{2!0!}\frac{2!}{2!0!} = 1
\end{aligned} \tag{37}$$

4. Ejemplo

En esta sección, se propone un ejemplo ilustrativo que presenta un modelo TS formado por 3 antecedentes que pueden tomar 2 valores, teniendo por tanto, un modelo con 8 modelos lineales interpolados. Para poder evaluar de forma comparativa la aportación del presente artículo, se han introducido unas variables a y b. Esto permite calcular para que valores de esos parámetros es posible de probar la estabilización del sistema con un PDC [1], con diferentes métodos y expansiones de sumatorio d. Las pruebas se han realizado mediante dos metodologías: [2] y con la propuesta del presente trabajo.

$$\begin{aligned}
A_{1,1,1} = A_1 &= \begin{pmatrix} 0{,}5 & -0{,}05 \\ 0 & -5 \end{pmatrix} \\
B_{1,1,1} = B_1 &= \begin{pmatrix} c \\ 0{,}1 \end{pmatrix} \\
c &= a + 0{,}01
\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
A_{1,1,2} = A_2 &= \begin{pmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{pmatrix} \\
B_{1,1,2} = B_2 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
A_{1,2,1} = A_3 &= \begin{pmatrix} -1 & 0{,}1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \\
B_{1,2,1} = B_3 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}4 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
A_{1,2,2} = A_4 &= \begin{pmatrix} b & -0{,}01 \\ 0 & -3 \end{pmatrix} \\
B_{1,2,2} = B_4 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}05 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
A_{2,1,1} = A_5 &= \begin{pmatrix} -0{,}7 & 0{,}2 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \\
B_{2,1,1} = B_5 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
A_{2,1,2} = A_6 &= \begin{pmatrix} 2 & -0{,}01 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \\
B_{2,1,2} = B_6 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}6 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned}
A_{2,2,1} = A_7 &= \begin{pmatrix} -0{,}5 & 0{,}1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \\
B_{2,2,1} = B_7 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}3 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}
A_{2,2,2} = A_8 &= \begin{pmatrix} b & -0{,}05 \\ 0 & -3 \end{pmatrix} \\
B_{2,2,2} = B_8 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0{,}2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{45}$$

Para que el sistema sea estable se imponen las siguientes condiciones:

$$Q_{ij} = -ZA_i - A_i^T Z + B_i N_j + N_j^T B_i^T \tag{46}$$

$$Z > 0 \tag{47}$$

$$N_j = F_j Z^{-1} \tag{48}$$

En la figura 1, utilizando el método desarrollado por [2], pueden verse los valores de los parámetros

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

a y b para los cuales es posible obtener un controlador borroso PDC que haga que el sistema sea estable. Por el contrario, en la figura 2, aparecen los valores de los parámetros a y b para los que se puede obtener un controlador PDC que haga estable el sistema, utilizando la metodología desarrollada en el presente artículo. Tal y como aparece indicado en las figuras 1 y 2, en ambos casos se han extendido los sumatorios de las funciones de pertenencia hasta valores de $d = 2, 3, 4, 5, 6$.

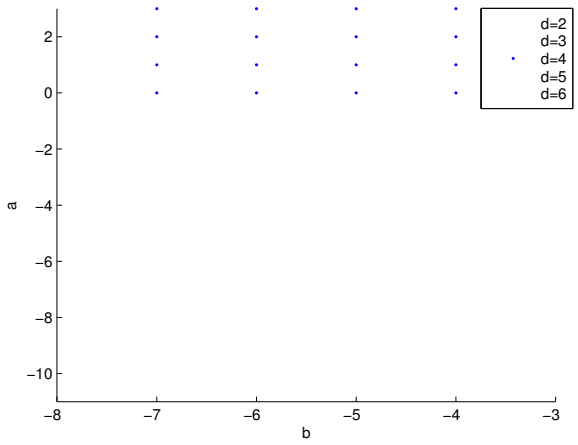


Figura 1: Con Polya Clásico [2]

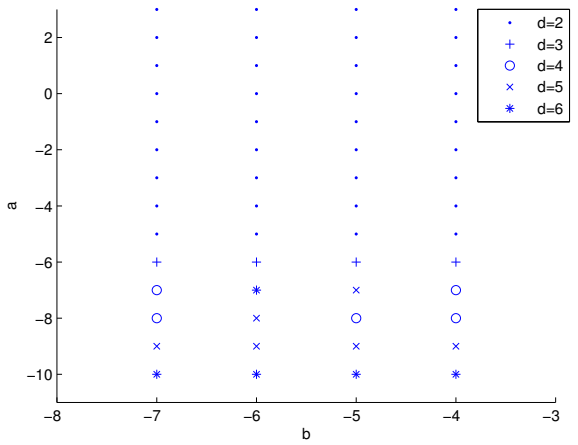


Figura 2: Con Polya Multiíndices

Como ha podio observarse, la pérdida de información que conlleva no utilizar el modelo con multiíndices causa que las condiciones de estabilidad sean menos relajadas, tal y como se constata en el ejemplo de esta misma sección. Por extensión, decir también, que en este artículo se intenta crear una metodología que facilite la aplicación del teorema de Polya [2] en sistemas TS, ya sea con o sin la utilización de multiíndices.

5. Conclusiones

En el presente artículo, se desarrolla una metodología basada en el teorema de Polya [2], que permite para sistemas Takagi-Sugeno expandir sumatorios de funciones de pertenencia para que las condiciones de estabilidad sean más relajadas, con la característica de que en el actual trabajo, se tienen en cuenta los valores de los antecedentes de cada una de las funciones de pertenencia que forman parte del sistema, tal y como se empezó a desarrollar en [3]. Esto hace que se tenga en cuenta más información a la hora de emplear esta técnica [2], y que por tanto puedan obtenerse resultados más precisos.

Referencias

[1] K. Tanaka, H. O. Wang, Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach, Wiley. com, 2004.

[2] A. Sala, C. Ariño, Asymptotically necessary and sufficient conditions for stability and performance in fuzzy control: Applications of polya's theorem, Fuzzy Sets and Systems 158 (24) (2007) 2671–2686.

[3] C. Ariño, A. Sala, Relaxed lmi conditions for closed-loop fuzzy systems with tensor-product structure, Engineering Applications of Artificial Intelligence 20 (8) (2007) 1036–1046.

[4] T. M. Guerra, L. Vermeiren, Lmi-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the takagi–sugeno's form, Automatica 40 (5) (2004) 823–829.

[5] H. D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo, Y. Yamamoto, Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design, IEEE Transactions on Fuzzy Systems 9 (2) (2001) 324–332.

[6] C.-H. Fang, Y.-S. Liu, S.-W. Kau, L. Hong, C.-H. Lee, A new lmi-based approach to relaxed quadratic stabilization of ts fuzzy control systems, Fuzzy Systems, IEEE Transactions on 14 (3) (2006) 386–397.

[7] C. Ariño, E. Pérez, A. Sala, F. Bedate, Polytopic invariant and contractive sets for closed-loop discrete fuzzy systems, Journal of the Franklin Institute 351 (7) (2014) 3559–3576.

[8] V. Powers, B. Reznick, A new bound for pólya's theorem with applications to polynomials positive on polyhedra, Journal of Pure and Applied Algebra 164 (1) (2001) 221–229.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[9] L. Xiaodong, Z. Qingling, New approaches to h^{∞} controller designs based on fuzzy observers for ts fuzzy systems via lmi, Automatica 39 (9) (2003) 1571–1582.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SISTEMA ROBOTICO DE TIPO EXOESQUELETO PARA REHABILITACION DE LA MANO

S.C. Enriquez, Y. Narváez, O.A. Vivas
Universidad del Cauca, scenriquez@unicauca.edu.co

J. Diez, F.J. Badesa, J.M. Sabater, N. Garcia-Aracil
Neuoringeniería Biomédica
Universidad Miguel Hernández de Elche, nicolas.garcia@umh.es

Resumen

El propósito de este artículo es describir el diseño, construcción y primera valoración de un dispositivo de tipo exoesqueleto para rehabilitación de mano en personas que hayan sufrido un Evento Cerebro-Vascular, en el cual la movilidad de la mano haya sido afectada, impidiendo la realización de actividades de la vida cotidiana. El dispositivo posee un grado de libertad activo en la articulación metacarpo falángica (MCP) y un grado de libertad pasivo en la articulación inter falángica distal (PIP) y en la articulación MCP por cada uno de los dedos, para que así el usuario pueda sujetar y trasportar algunos elementos al igual que abrir y cerrar su mano de la manera más natural y cómoda, brindando además la mayor seguridad posible usando un sistema de actuación neumático.

Palabras Clave: Exoesqueleto, Rehabilitación, Neumático.

1 INTRODUCCIÓN

Cada vez es mayor el riesgo de sufrir un Evento Cerebro-Vascular (ECV), y se proyecta un incremento considerable en la prevalencia de esta afección llegando a cifras que sobrepasarán los cuatro millones de casos para el 2030 con un incremento estimado del 24.9% de la prevalencia respecto a la actual [6]. Esto demuestra la importancia de programas de prevención, tratamiento y rehabilitación.

Según la Asociación Americana del Corazón (AHA por sus siglas en ingles), entre los sobrevivientes del ECV mayores de 65 años, el 50% de ellos quedan con algún tipo de parálisis y el 26% son dependientes en actividades de la vida diaria, convirtiéndose por lo tanto en una de las principales causas de discapacidad a largo plazo [12]. La enfermedad cerebro vascular afecta de manera considerable e impacta significativamente la calidad de vida de las personas que logran sobrevivir, siendo las principales secuelas las de origen motor, donde se ven afectados grupos musculares que son importantes para la realización de tareas cotidianas destacándose el miembro superior, y en esencia la mano, como sistema efector de lo que nos caracteriza como especie. Es de suponer que cuando se pierde o se limita la función motora de la mano se pierde también una gran parte de la funcionalidad.

En el mercado se puede encontrar una gran oferta de dispositivos robóticos diseñados para asistir la terapia de rehabilitación del miembro superior, enfocándose en recuperar la movilidad de grupos osteomusculares como el codo y el hombro [1] [5] [8] [11] [18], pero como se señaló con anterioridad es importante ofrecer a estos pacientes la posibilidad de una terapia integral que posibilite la rehabilitación más completa del miembro superior, e incluya la función motora de la mano. No obstante, existen algunos pocos mecanismos que sí realizan esta como lo son el Hexxor desarrollado en la Universidad Católica de América [15], Amadeo creado en Austria por la compañía de ingeniería médica *Tyromotion* [16], y el Gloreha realizado por la empresa italiana Idrogenet en colaboración con la Universidad de Brescia, Italia [2], entre otros [14] [17]. Pero al hacer el balance entre el número de dispositivos de hombro y codo existente con el número de dispositivos de mano, la diferencia es notable.

Por lo tanto es pertinente enfocarse en la realización de un dispositivo robótico diseñado especialmente para terapias de rehabilitación de mano que le proporcione al paciente la capacidad de realizar movimientos de pinza, que le permita sujetar algunos elementos y realizar la apertura y cierre de esta. Por eso el principal objetivo del dispositivo tratado en este artículo es el de conducir la mano para realizar el movimiento adecuado, logrando la reeducación de esta.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 DISEÑO DEL DISPOSITIVO

2.1 DEFINICIÓN

Se puede afirmar que la mano es uno de los miembros más vitales y complejos que posee el ser humano, anatómicamente hablando cada dedo de la mano está compuesto por tres falanges, en donde la falange proximal (FP) se articula con la falange media (FM) y esta con la falange distal (FD), conocidas también como 1º, 2º y 3º falange, a excepción del dedo pulgar que tan solo tiene dos falanges [3].

Cada uno de los dedos puede realizar movimientos de flexión y extensión en la articulación MCP, articulación PIP y en la articulación inter falángica proximal (DIP); y el pulgar en la articulación inter falángica (IP) y en la articulación MCP. Además, pueden realizar movimientos de abducción y aducción o movimientos de lateralidad, pero solo en la articulación MCP, tanto en el pulgar como en el resto de los dedos. El rango de flexión y extensión, aumenta progresivamente desde el dedo índice, hasta alcanzar el mayor nivel en el dedo meñique, estos valores se pueden observar en la tabla 1. [9]

En total los dedos y el pulgar tienen 21 grados de libertad y el brazo desde la muñeca hasta el hombro tienen sólo 7 grados de libertad [10], por lo cual es evidente apreciar la complejidad de la mano respecto a otras partes del cuerpo.

Por otro lado, gracias al desarrollo motor de la mano es posible realizar acciones de sujeción y transporte de elementos, a esto se le denomina *prensión*, y es una de las principales funciones de la mano, que poseemos desde que nacemos, siendo en los primeros meses de vida un reflejo involuntario que controlamos y desarrollamos al crecer [4].

La prensión puede clasificarse como "de precisión" o "de fuerza", combinándose de formas distintas el pulgar y los dedos en cada una de ellas. En la prensión de precisión el objeto que se desea sujetar suele ser pequeño, se ase entre los pulpejos de los dedos, que se ciñen al objeto y adaptan a su forma. En la presión de fuerza, en la que se requiere bastante potencia, actúa toda la mano, existen dos tipos de agarre de potencia: prensión palmar, en donde toda la mano se ase al objeto y el pulgar actúa de contrafuerte para los dedos que se ciñen entorno al objeto, y prensión en gancho en donde el objeto se ase con firmeza entre la palma y los dedos flexionados, y el pulgar no ejerce tarea alguna. [13]

Con lo mencionado anteriormente se estableció para el diseño del dispositivo: que este debería estar enfocado en la función de prensión de potencia, y que por lo tanto debería de contar con un grado de libertad activo en la articulación MCP y un grado de libertad pasivo en la articulación PIP, logrando así la apertura y cierre de la mano, y un grado de libertad pasivo en la articulación MCP, dándole más libertad a los dedos y permitiéndoles una ubicación más habitual, no solo brindándole la mayor comodidad al paciente sino también logrando mayor naturalidad en el movimiento, cumpliendo por lo tanto con la finalidad del desarrollo del dispositivo expuesta.

Además es necesario tener en cuenta que para realizar una correcta terapia de rehabilitación de mano es esencial dejar la zona palmar libre de cualquier elemento, para que el paciente pueda lograr sentir los elementos que sujeta, condición que se tuvo que tener en cuenta al momento de hacer el diseño asistido por computadora (CAD).

2.2 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Indagando sobre diferentes tecnologías usadas para dispositivos robóticos de tipo exoesqueleto para terapias de rehabilitación de mano [7] [10], existen distintas alternativas como el de tener enlaces rígidos en contacto directo con los dedos o exoesqueletos tipo guante, se optó por un mecanismo de centro virtual de movimiento (VCM).

Un mecanismo VCM es un mecanismo planar en el que uno de sus *enlaces* puede rotar alrededor de un punto fijo distal en el plano, sin existir una articulación de revolución en el punto fijo que los una [19].

La principal ventaja que presenta esta tecnología y cumpliendo con la definición anteriormente descrita,

Tabla 1: Rango de movimiento de las articulaciones de los dedos

	Articulación	Angulo Flexión(º)	Angulo Extensión(º)	Angulo Lateralidad(º)
Dedos	DIP	60-90	< 5	---
	PIP	90-135	---	---
	MCP	70-100	30-40	40-60
Pulgar	IP	75-80	5-10	---
	MCP	60-70	---	25-27
	CMC	120		45

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

es que no está en contacto directamente con la articulación MCP y PIP del paciente que lo esté usando (desempeñando estas el papel de punto fijo). Si lo estuvieran, sería imprescindible que el centro de rotación del dispositivo de tipo exoesqueleto construido coincidiera con las articulaciones del paciente que lo fuera usar, si esto no se cumpliera podría perjudicar seriamente al paciente.

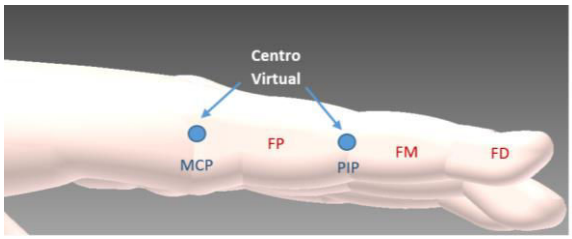


Figura 1: Ubicación de los centro virtuales.

Los centros virtuales de movimientos se ubicaron en la articulación MCP y PIP.

La articulación PIP es la que se encuentra ubicada entre la falange media y la falange proximal, en esta será la falange media quien rote alrededor del centro virtual establecido.

La articulación MCP es la que se encuentra ubicada entre la cabeza del metacarpo y la falange proximal, en esta será la falange proximal quien rote alrededor del centro virtual establecido.

Cabe resaltar que el movimiento en las articulaciones se debe realizar al mismo tiempo, siendo así el movimiento innato en una persona.

2.3 DISEÑO CAD

El sistema en sí consiste en una base que recubre la mano por la parte posterior o dorso (de manera que la zona palmar queda libre), de tal manera que sirve de plataforma para cada sub ensamble de cada uno de los dedos, siendo además lo suficientemente amplia para poder albergar el sistema de todos los dedos y de sus actuadores, sin existir ningún tipo de colisión entre estos.

El sistema de cada dedo está formado por guías circulares y un conjunto de palancas para lograr la trasmisión del movimiento de la articulación MCP a la PIP, logrando el movimiento simultáneo en ambas. El tamaño de estas piezas se hizo de acuerdo al dedo que pertenecía. Con el objetivo de lograr movimientos laterales (de cada uno de los dedos), la sujeción de este a la base no es fija, si no que se hace a través de una pequeña base giratoria con topes a los costados para de esa manera limitar el movimiento.

Una ventaja de no tener fija la unión entre cada sub-ensamblaje de los dedos a la base, es que no es necesario que sus actuadores o cilindros estén alineados con cada uno de los dedos. En la mayoría de los exoesqueletos que se encuentran en el mercado, estos tienen que estar organizados de tal manera que coincidan con la posición del dedo al que pertenecen, existiendo una pequeña inclinación unos a otros y restringiendo a esa posición los dedos, además establecer su apropiada ubicación es una labor compleja. Por el contrario, el diseño planeado para el dispositivo a desarrollar permite que los actuadores estén ubicados paralelos uno de los otros, a excepción del que corresponde al dedo pulgar, sin afectar el correcto movimiento de la mano y dándole mayor libertad a la posición de los dedos, dado que no todos tenemos los dedos organizados de una manera idéntica (Figura 2).

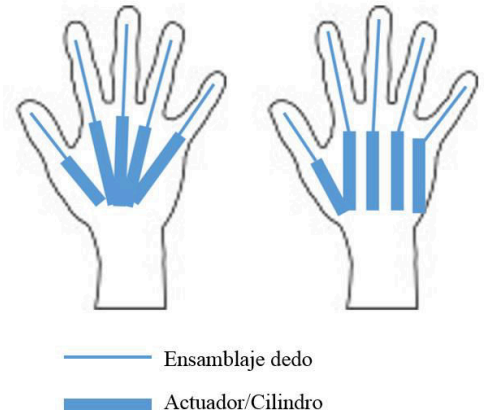


Figura 2: Posición habitual de actuadores en exoesqueletos (*izquierda*) y en el dispositivo desarrollado *(derecha)*

Después de tener definido el diseño CAD se fabrican las piezas para su posterior ensamblaje y construcción del prototipo (Figura 3).

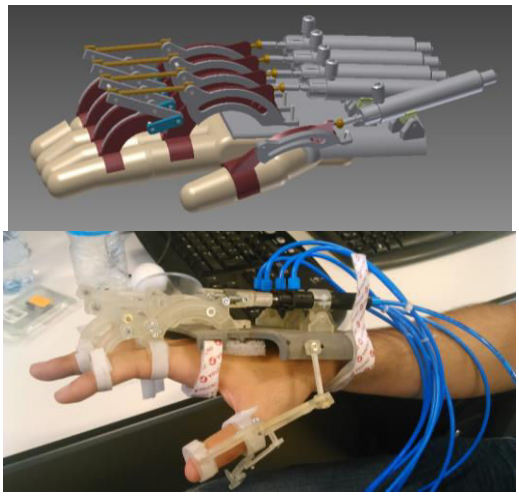


Figura 3: Diseño CAD y prototipo fabricado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para asegurar el dispositivo a la palma se emplea velcro en la parte inicial de ésta y en la muñeca, la sujeción de los dedos se hace a través de piezas en forma de anillo y velcro en la falange proximal y media.

2.4 SISTEMA DE ACTUACIÓN

Puesto que es un dispositivo exoesqueleto que está en contacto con el usuario, un mal funcionamiento podría perjudicar al paciente razón por la que se prefirió un sistema de actuación neumático debido a la seguridad que este proporciona, siendo este uno de los factores más importantes a tener en cuenta.

Para el accionamiento del mecanismo se seleccionó un cilindro lineal neumático de doble efecto (Cilindro DFK-10-50-P de Festo) por cada dedo, dos válvulas reguladoras de presión (MPPES-3-1/8-10-010) (Figura 4). Debido a que al momento de accionar los cilindros estos realizaban el recorrido demasiado rápido provocando un movimiento brusco, se usaron estranguladores para disminuir el paso de aire y realizar el recorrido más lentamente.

Este sistema brinda seguridad ya que al comparar la rigidez del sistema con algún otro, éste, a pesar de proporcionar la fuerza suficiente para realizar el movimiento puede contrarrestarse si es el caso, ya que el aire es deformable, por lo que puede ser comprimido por el usuario, debido a que la válvula tiene una salida de escape de aire.

El control de las válvulas se efectúa a través de un *phidget* conectado mediante USB al ordenador, con un programa en MATLAB se determina el momento y el valor con las que estas se deben accionar (Figura 4).

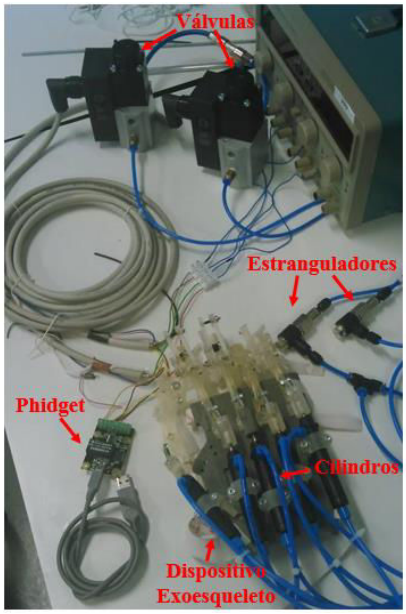


Figura 4: Sistema neumatico de actuación.

El sistema de actuación está proyectado para que el movimiento de los dedos no se realice individualmente, si no que todos se abran o cierren a la vez.

3 CONSTRUCCION PROTOTIPO

Hasta el momento un primer prototipo del dispositivo se ha desarrollado y probado para todos los dedos. En este prototipo se pudo analizar el funcionamiento y comportamiento que este presentaba al efectuar el movimiento. Se alcanzaron aproximadamente 58º en el rango de movimiento para la articulación MCP y aproximadamente 60º de rango en el movimiento de la articulación PIP, concibiendo que estos rangos son suficientes para poder sujetar y transportar algunos elementos (Figura 5).

El accionamiento se realizó simultáneamente para todos los dedos, es decir todos ellos se cerraban y abrían al mismo tiempo.

Se debe tener en cuenta que para que la terapia de rehabilitación se realice de la mejor manera y el dispositivo exoesqueleto no perjudique a la persona que lo lleve puesto es necesario que las articulaciones de la mano del paciente estén alineadas con los centros virtuales establecidos en el exoesqueleto, esto se logra ajustando la base del dispositivo correctamente en la mano del paciente que lo lleve puesto.

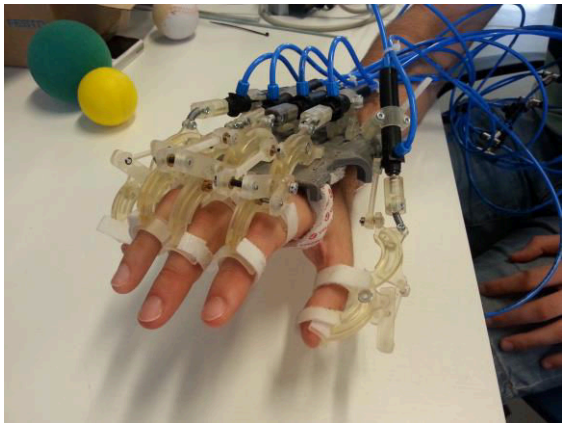


Figura 5: Dispositivo exoesqueleto para rehabilitación de mano.

4 RESULTADOS

Una de las pruebas desarrolladas para evaluar el desempeño del dispositivo exoesqueleto consistió en que un usuario llevara puesto el dispositivo y sujetara con la ayuda de éste diferentes elementos,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

en los que se encontraba: una botella de agua vacía, un vaso de plástico, bolas de diferente tamaños (88mm, 60mm y 45mm de diámetro), un móvil de tamaño medio, entre otros, para observar así los rangos de cierre del dispositivo y como acoplaba este la mano a los diferentes elementos (Figura 6).

El resultado de estas pruebas fue satisfactorio ya que el usuario fue capaz de sostener los diferentes elementos, transportarlos y no dejarlos caer hasta que al dispositivo se le diera la orden de soltarlos, por lo tanto, desarrollando la tarea correctamente.

Respecto a las bolas, el usuario cerró la mano alrededor de todas estas de la manera adecuada, demostrando que el dispositivo permite la sujeción de elementos de diferentes tamaños y permite a la mano ceñirse alrededor de estos.

Además, se comprobó la correcta posición del dedo pulgar, dedo primordial para desarrollar las tareas de prensión de la forma apropiada, si la posición del dispositivo para este dedo no es la adecuada, no se podrían sujetar ningunos de los elementos mencionados anteriormente.

Por otro lado, aunque en un principio un objetivo del dispositivo era la apertura y cierre de la mano, el cierre no se logra completar totalmente debido a la estructura del exoesqueleto, por lo que con este se logra un cierre parcial.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

El objetivo del trabajo descrito aquí fue diseñar y construir un dispositivo de tipo exoesqueleto para rehabilitación de mano, que cuenta con un total de 5 grados de libertad activos, para permitir la sujeción y trasporte de ciertos elementos a la persona que lo use, y 5 grados de libertad pasivos para darle más flexibilidad y naturalidad a los movimientos.

El rango de movimiento que presenta el dispositivo exoesqueleto es lo suficiente para lograr que la persona que lo lleve puesto coja con su propia mano determinados objetos y pueda trasportarlos. Igualmente este dispositivo permite la apertura completa y cierre parcial de la mano, además de ejecutar estas tareas de una manera natural y cómoda,

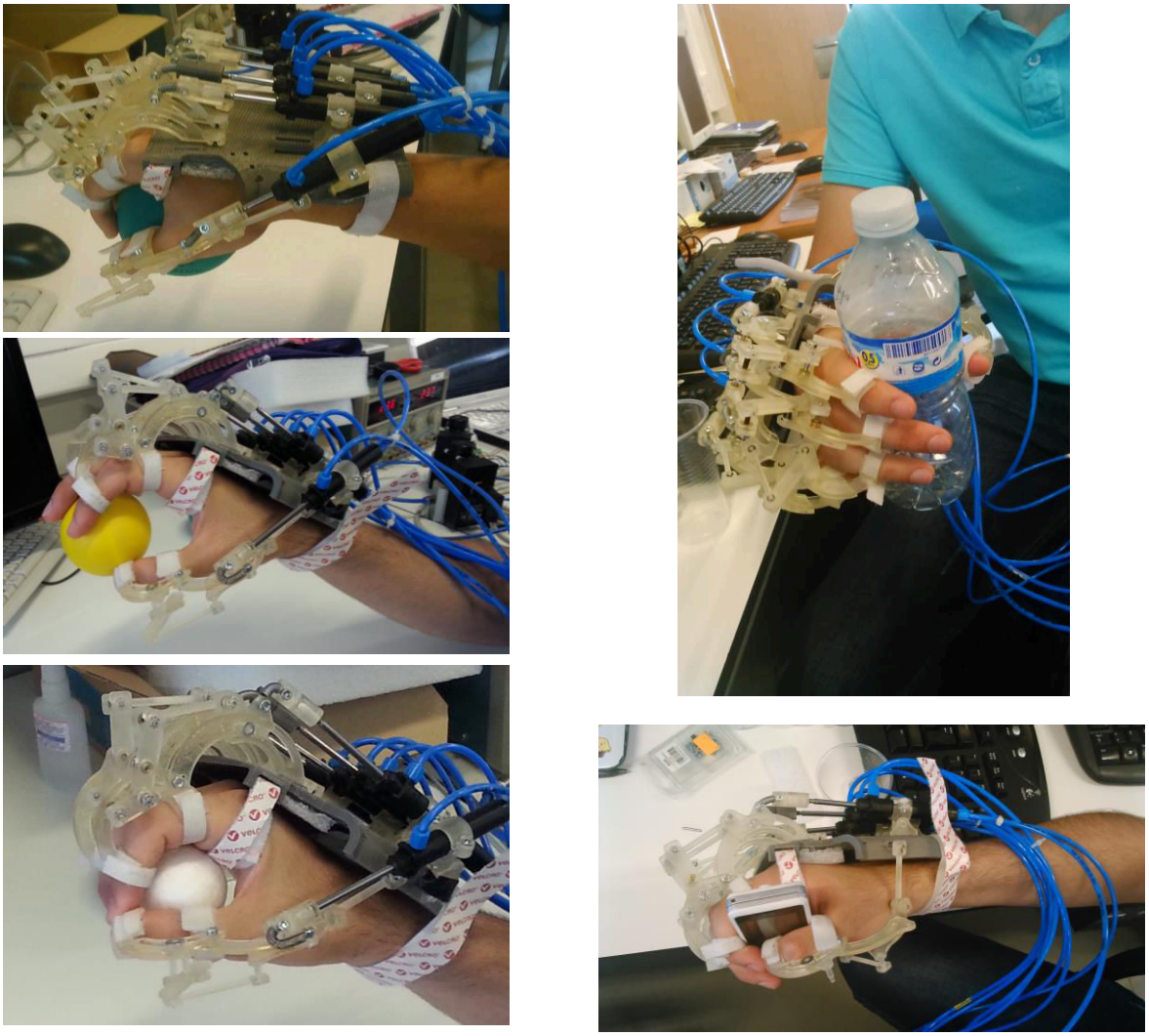


Figura 6: Sujeción de diferentes elementos con la ayuda del dispositivo exoesqueleto.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cumpliendo por lo tanto con los objetivos por los cuales fue desarrollado el dispositivo.

Para acreditar completamente la funcionalidad y asistencia que puede ofrecer el dispositivo exoesqueleto es necesario realizar diferentes pruebas en personas sanas, para posteriormente realizar una evaluación de este en pacientes que tengan la mano afectada, comprobando así si los beneficia en su recuperación y en su independencia para realizar actividades cotidianas o no.

Agradecimientos

Este trabajo has sido financiado por el Plan Nacional de I+D+i a través del proyecto "Interpretación de la intención y actuación humana mediante señales biomédicas y el análisis cinemático y dinámico del movimiento" (DPI2011-29660-C04-04).

Referencias

[1] Badesa, F. J., Llinares, A., Morales, R., Garcia-Aracil, N., Sabater, J. M., & Perez-Vidal, C. (2014). Pneumatic planar rehabilitation robot for post-stroke patients. *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, *26*(02).

[2] Borboni, A., Fausti, D., Mor, M., Vertuan, A., & Faglia, R. Un dispositivo CPM per la riabilitazione della mano.

[3] Brizuela Mendoza, J. A. y Soto Yuriar, J. H. (2010). Diseño de un Equipo Auxiliar en Terapias de Rehabilitación de Extremidades de Miembro Superior a Nivel de Dedos.

[4] Cañas Gutiérrez, A. M.(2010). El esquema corporal. *Innovación y Experiencias Educativas.*

[5] Casadio, M., Sanguineti, V., Morasso, P. G., & Arrichiello, V. (2006). Braccio di Ferro: a new haptic workstation for neuromotor rehabilitation. *Technology and Health Care*, *14*(3), 123-142.

[6] Heidenreich PA, Trogdon JG, Khavjou OA, Butler J, et al, Forecasting the future of cardiovascular disease in the United States: a policy statement from the American Heart Association. Circulation. 2011; 123:933–94.

[7] Heo, P., Gu, G. M., Lee, S. J., Rhee, K., & Kim, J. (2012). Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering.*International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *13*(5), 807-824.

[8] Krebs, H. I., Hogan, N., Aisen, M. L., & Volpe, B. T. (1998). Robot-aided neurorehabilitation. *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, *6*(1), 75-87.

[9] López Doménech, L.M. (2009). Dispositivo Robótico para el Control de Falanges Durante la Rehabilitación Mediante FNP.

[10] Lum, P. S., Godfrey, S. B., Brokaw, E. B., Holley, R. J., & Nichols, D. (2012). Robotic approaches for rehabilitation of hand function after stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *91*(11), S242-S254.

[11] Morales, R., Badesa, F. J., García-Aracil, N., Sabater, J. M., & Pérez-Vidal, C. (2011). Pneumatic robotic systems for upper limb rehabilitation. *Medical & biological engineering & computing*, *49*(10), 1145-1156

[12] Mozaffarian D, Roger VL, Benjamin EJ, Berry JD, et al . Heart disease and stroke statistics—2013 update: a report from the American Heart Association . Circulation . 2013;127:e000-e000.

[13] Palastanga, N., Field, D., & Soames, R. (2007). *Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento*. Editorial Paidotribo.

[14] Santoja Guerrero, I. (2012). Diseño e implementación de sistemas de control aplicados a un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano.

[15] Schabowsky, C. N., Godfrey, S. B., Holley, R. J., & Lum, P. S. (2010). Development and pilot testing of HEXORR: hand EXOskeleton rehabilitation robot. *J Neuroeng Rehabil*, *7*(36), 1-16.

[16] Stein, J., Bishop, L., Gillen, G., & Helbok, R. (2011, June). A pilot study of robotic-assisted exercise for hand weakness after stroke. In *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.

[17] Yihun, Y., Miklos, R., Perez-Gracia, A., Reinkensmeyer, D. J., Denney, K., & Wolbrecht, E. T. (2012, August). Single Degree-of-Freedom Exoskeleton Mechanism Design for Thumb Rehabilitation. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE* (pp. 1916-1920). IEEE.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[18] Zariffa, J., Kapadia, N., Kramer, J. L., Taylor, P., Alizadeh-Meghrazi, M., Zivanovic, V., ... & Steeves, J. D. (2011, June). Effect of a robotic rehabilitation device on upper limb function in a sub-acute cervical spinal cord injury population. In *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.

[19] Zong, G., Pei, X., Yu, J., & Bi, S. (2008). Classification and type synthesis of 1-DOF remote center of motion mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*,*43*(12), 1585-1595.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Estudio de la navegación de un planeador autónomo submarino

Giménez Martínez, J.,* Loeff, E.,* García Moreno, E.†

Resumen

En este artículo se presentará el conjunto de un sistema de navegación para un Planeador Autónomo Submarino (PAS). Para ello hay 2 sistemas principales; primero está el actuador, que en el caso de un PAS es un variador de flotabilidad, ya que un PAS no lleva motor pero utiliza fundamentalmente los deslizamientos descendentes y ascendentes para moverse, y en segundo lugar esta el sistema de posicionamiento, que suele consistir de un modulo GPS para determinar la posición del PAS cuando salga a la superficie. Para este trabajo se ha estudiado diferentes formas de variación de flotabilidad y en vez de solamente la determinación de la posición mediante GPS, incorporar una Unidad de Medición Inercial (UMI) para la navegación bajo el agua, puesto que la forma principal de navegación del PAS es por estima, y el GPS sólo actuará para corregir la posición cuando se encuentre en la superficie.

Palabras clave: Planeador Autónomo Submarino, Flotabilidad, Estudio comparativo, Unidad de Medición Inercial, pistón simple.

1 Introducción

Igual que un planeador aéreo, que se mueve por el aire sin motor, el Planeador Autónomo Submarino (PAS) se mueve por el agua sin propulsión propia. Utiliza la variación de la flotabilidad para moverse por el agua verticalmente, y con ayuda de unas alas, aprovecha la componente de avance horizontal de los movimientos de deslizamiento. Cambiando el balasto y moviendo el angulo de las alas, permite una mayor movilidad. Así describió Henry Stommel el *Slocum*[6] en 1989 en la revista científica *Oceanography* y introdujo así el término al la comunidad oceanográfica.

En el año 2005, no solamente se había mostrado el funcionamiento del modelo de Stommel, basada en la energía térmica (*Slocum Thermal*) por Webb Research, también fueron desarrollados otros PAS por otras instituciones con una autonomía y una eficiencia impresionante. El *Seaglider*[1] de la Universidad de Washington y el *Spray*[5] de Scripps Institution of Oceanography son unos ejemplos de ellos.

2 Flotabilidad

2.1 Teoría

Variando la relación peso/volumen de un cuerpo, se puede variar la flotabilidad de este, resultando en una flotabilidad positiva, negativa o neutra. Pues bien centrándonos en nuestro problema, cuando tengamos el tanque de lastre lleno, decimos que tenemos una flotabilidad negativa (el PAS está sumergiéndose), en el momento en que el tanque de lastre este vacío, tendremos una flotabilidad positiva (PAS ascendiendo hacia la superficie o en la superficie). Para ellos podemos ver distintos métodos que serán comentados a continuación.

2.2 Métodos de control de flotabilidad

En la actualidad, existen diversos métodos para el control de la flotabilidad, pero son dos los escogidos a priori para nuestro PAS.

Bomba hidráulica

Este sistema [4] consta de un depósito de aceite contenido en el casco de presión (VBT:Tanque de lastre variable) y el vejiga del aceite se muestra en la figura 1.

*Estudiantes del Máster Universitario en Sensores para Aplicaciones Industriales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N, 46022 Valencia, España. Email: juagima2@etsia.upv.es, edloe@upvnet.upv.es

† Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N, 46022 Valencia, España
Email: egarciam@isa.upv.es

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 1: Ejemplo de un tanque de lastre variable

La figura 2 muestra de una manera muy gráfica este sistema, en un primer momento el PAS se encuentra en la superficie, y para comenzar el descenso es decir, flotabilidad negativa, en ese momento el aceite se está moviendo del VBT a la vejiga y por tanto el PAS está descendiendo, una vez la vejiga está completamente llena, es decir el PAS se ha sumergido 350 metros, comienza el proceso inverso, es decir la bomba que movía el aceite desde la VBT a la vejiga, invierte su polaridad y ahora mueve al sentido contrario desde la vejiga al VBT logrando una flotabilidad negativa y que el PAS ascienda a la superficie, Es decir, la función de la vejiga es la de expulsar agua o coger agua, cuando este comience la inmersión la bomba moverá el aceite hacia el tanque fijo, la vejiga comenzará a contraerse dejando entrar agua en el interior consiguiendo así la inmersión del mismo y cuando el PAS requiera expulsar esa agua para ascender, la bomba moverá el aceite hacía la vejiga, inflándola y expulsando el agua, con lo cual este comenzará a ascender. Cabe destacar que el PAS, no desciende sin control hacia el fondo marino sino, está programado para mantener una distancia de seguridad sobre el fondo marino.

Pistón de un solo efecto

Este sistema pasa por ser el más sencillo de los dos pero por el contrario de lo que pueda parecer es el menos práctico, pero esto lo discutiremos en el

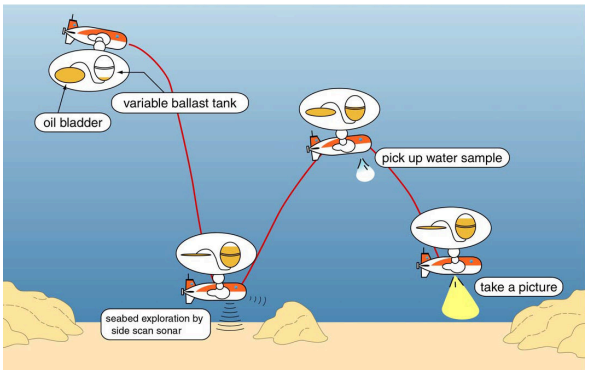


Figura 2: Movimiento del PAS

apartado de conclusiones.

Este sistema consta de, un cilindro de simple efecto y un motor. En primer lugar el motor gira y hace girar el elemento de tornillo sin fin situado en su eje. Este elemento, a su vez está en contacto con los dientes de un engranaje situado en el eje donde se encuentra el sistema piñón cremallera. Al girar el elemento tornillo sin fin, gira todo el eje y convertimos un movimiento angular en un movimiento longitudinal. Como vemos, este simple sistema de transmisión de movimiento permite pasar del movimiento angular proveniente del motor al movimiento transversal deseado para el movimiento del pistón.

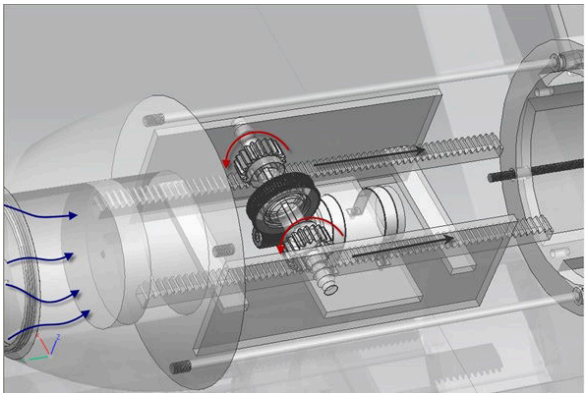


Figura 3: Llenado del tanque de lastre

Como podemos observar en la figura 3, el giro del motor hace mover todo el sistema de engranajes, con ellos movemos el pistón de manera que se llena de agua el tanque de lastre situado en la cabeza del PAS, logrando así flotabilidad negativa, es decir, el PAS comienza su inmersión.

Por otro lado si se quiere ascender el PAS, el motor

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

se pone en marcha pero como en el caso anterior invirtiendo su polaridad, de esa manera expulsa el pistón, expulsa el agua del tanque de lastre, y logra ascender, obteniendo flotabilidad positiva.

2.3 Especificaciones técnicas de cada método

Para el estudio de la bomba hidráulica mas adecuada, hemos escogido los siguientes modelos, ambos dos modelos del fabricante alemán HAWE, que tras hacer un estudio de mercado, este fabricante, era el que mejor se ajusta nuestras expectativas calidad/precio. Este tipo de bombas compactas constan de una carcasa (tanque) con motor integrado y bomba, de manera que en un mismo sistema incorporamos dos equipos.

Opcion A: NPC 11

Características técnicas:
Tipo de bomba: bomba de pistones radiales o de engranajes
Presión máxima (Pmax): 750 bar
Caudal máximo (Qmax): 1.36 l/m
Tensión nominal: 12VDC/24VDC
Potencia nominal: 0.1/0.3 kW
Peso: 6 kg

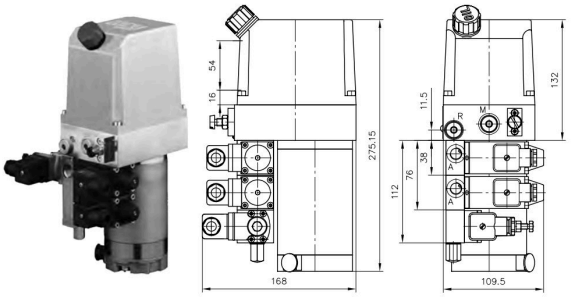


Figura 4: Bomba NPC 11

Opción B: K60m Bomba De pistones axiales y caudal fijo

Características técnicas: Tipo de bomba: bomba de pistones radiales o de engranajes Presion máxima (Pmax): 400 bar
Caudal máximo (Qmax, 500 rpm):5,8 l/m
Caudal máximo (Qmax, 1000 rpm):12 l/m
Caudal máximo (Qmax, 1500 rpm):18,3 l/m
Tension nominal: 12VDC/24VDC
Potencia nominal: 12W
Peso: 8.1 kg

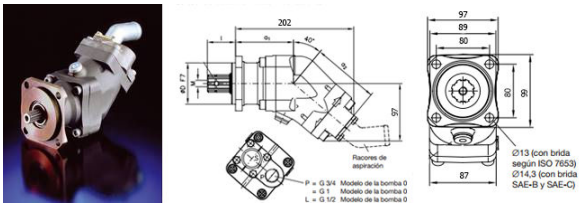


Figura 5: Bomba K60m

2.4 Conclusión

Llegados a este punto es necesario decidir que bomba, es decir, que motor escoger, pues bien tres son los requisitos que han de tener todos los componentes, peso, tamaño y consumo razonable. La siguiente tabla muestra lo citado anteriormente:

Característica/Modelo	NPC 11	K60M
Peso (kg)	6	8.1
Tamaño (mm)	297x168	257x107
Consumo (W)	100/300	12

Por tanto la opción escogida para nuestro PAS, es la opción A, aunque este tenga más consumo y más tamaño, en nuestro caso prima el peso por encima de las otras dos condiciones, pues el peso es uno de los factores que más importancia tiene en nuestro PAS, ya que el paso máximo de nuestro PAS, es de 50kg para facilitar así su transporte.

3 Navegación

Antiguamente se navegaba por estima, lo que quiere decir es que teniendo en cuenta la posición inicial, el rumbo, la velocidad y el tiempo transcurrido, se puede calcular la posición actual. Pero por los factores externos como el viento y corrientes, la posición siempre será una posición estimada. Cuanto más tiempo ha trascurrido desde la última posición conocida, más grande será el error acumulado en la posición estimada.

Un PAS equipado con una Unidad de Medición Inercial también utiliza la navegación por estima, ya que no sabe su posición actual con exactitud por la falta de señales GPS debajo de la superficie del agua. Para poder contrarrestar las influencias externas, los PAS tienen un sistema ingenioso para poder hacer pequeños cambios en el rumbo moviendo su pack de baterías de proa a popa y de babor a estribor para así cambiar su punto de gravedad y hacer girar el planeador. Usan el pack de baterías ya que es lo más pesado a bordo. Por ejemplo en el Slocum G2

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Glider las baterías representan una tercera parte del peso total de 54kg, por tanto en el presente apartado se van a estudiar diferentes opciones para la navegación submarina del PAS, con el objetivo de seleccionar el sensor mas adecuado para la navegación submarina del mismo.

3.1 Medidas inerciales

Una Unidad de Medición Inercial o UMI, es un dispositivo electrónico que mide e informa sobre la velocidad de una nave, la orientación y las fuerzas gravitacionales, utilizando una combinación de acelerómetros y giroscopios, y a veces magnetómetros también. Una UMI se utiliza normalmente para maniobrar una aeronave, incluidos los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), entre muchos otros, naves espaciales, incluidos los satélites y los aterrizadores. Una UMI permite a sistema de posicionamiento trabajar cuando las señales GPS no están disponibles, como por ejemplo en túneles, dentro de los edificios, o cuando hay interferencia electrónica presente. Debajo del agua tampoco hay disponibilidad de una señal GPS. Gernot[3] encontró experimentalmente que una película de solamente 1mm de agua ya resulta en una atenuación de la señal GPS de 9.4 dB. Por ello una Unidad de Medición Inercial será una adición ideal para un Planeador Autónomo Submarino.

Una unidad de medición inercial funciona detectando la velocidad actual de aceleración utilizando uno o más acelerómetros, y detecta cambios en los atributos de rotación como el cabeceo, balanceo y guiñada usando uno o más giroscopios.

Los sistemas de navegación inercial contienen Unidades de Medición Inerciales que tiene acelerómetros angulares y lineales (por cambios en la posición); algunos UMI incluyen un elemento giroscópico (para mantener una referencia angular absoluta).

Los acelerómetros angulares miden cómo el vehículo está girando en el espacio. En general, hay por lo menos un sensor para cada uno de los tres ejes: el cabeceo (nariz hacia arriba y hacia abajo), guiñada (nariz izquierda y derecha) y el guiñada (giro alrededor del eje longitudinal).

Los acelerómetros lineales miden aceleraciones no gravitacionales del vehículo. Dado que puede moverse en tres ejes (arriba y abajo, izquierda y derecha, adelante y hacia atrás), hay un acelerómetro lineal para cada eje.

Un ordenador calcula continuamente la posición actual del vehículo. En primer lugar, para cada uno de los seis grados de libertad (x, y, z y θx, θy y θz), se integra en el tiempo la aceleración detectada, junto con una estimación de la gravedad, para calcular la velocidad actual. A continuación se integra la velocidad para calcular la posición actual.

Sistemas de orientación inercial generalmente se combinan con los sistemas de navegación por satélite a través de un sistema de filtrado digital. El sistema inercial proporciona los datos a corto plazo, mientras que el sistema de satélites corrige errores acumulados del sistema inercial.

3.1.1 Giroscopios

Un giroscopio es un dispositivo para medir o mantener la orientación y actitud, y funciona según los principios del momento angular. El más conocido es el modelo clásico que aprovecha el principio de rigidez giroscópica de un disco giratorio en un entorno donde el eje es libre de asumir cualquier orientación, pero desde entonces se han encontrado muchas formas de hacer giroscopios para una variedad amplia de productos. Se muestran algunos en la figura 6 ordenados por tamaño y precisión.

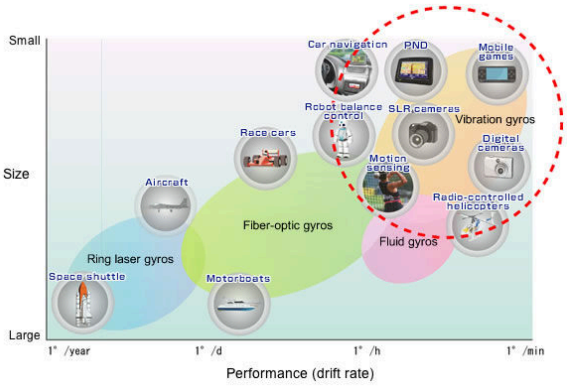


Figura 6: Tipos de giroscopios

La orientación del dispositivo permanece casi fijo, con independencia del movimiento de la plataforma de montaje, ya que montar el dispositivo en un cardán minimiza el par externo.

Otro tipo de giroscopio es el Ring Laser Gyroscope (RLG) o giroscopio de anillo láser (Figura 7), que envía dos haces de láser en direcciones contrarias por el mismo camino para detectar giros.

Funciona según el efecto de Sagnac, que es un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

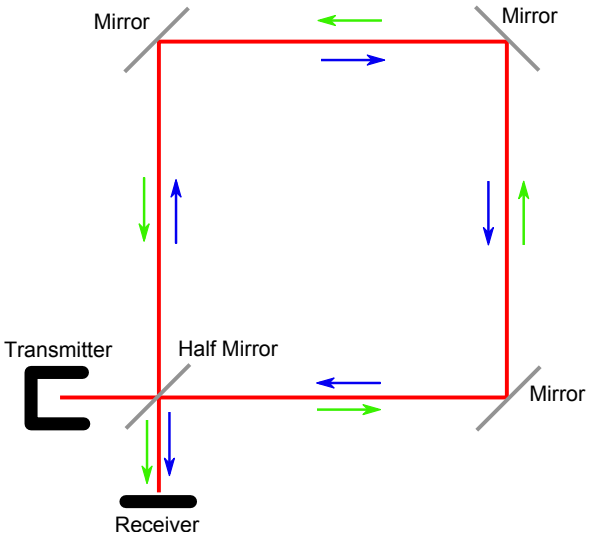


Figura 7: Funcionamiento de un RLG

fenómeno que se ha encontrado en interferometría que se produce por la rotación. El efecto Sagnac se manifiesta en una configuración llamada interferometría de anillo. Un haz de luz se divide en dos cada haz se hace seguir una trayectoria en direcciones opuestas. Para actuar como un anillo, la trayectoria debe formar un anillo cerrado. Al volver al punto de entrada de los haces, se dejan salir del anillo de tal forma que se obtiene un patrón de interferencia. La posición de las franjas de interferencia depende de la velocidad angular de la instalación. Esta disposición también se llama un interferómetro de Sagnac.

El efecto Sagnac es la contraparte electromagnética de un giroscopio mecánico. Sin embargo, los principios subyacentes de los dos dispositivos son diferentes. Un giroscopio utiliza el principio de conservación del momento angular, mientras que el interferómetro se ve afectado por fenómenos relativistas.

El giróscopo de estructura vibrante es un tipo de giroscopio que funciona de manera similar a los halterios presentes en algunos insectos. El principio físico subyacente es que un objeto vibrante tiende a continuar vibrando en el mismo plano que gira su apoyo. En la literatura de ingeniería, este tipo de dispositivos se conocen como "giroscopio de vibración de Coriolis", debido a que a medida que el plano de oscilación gira, la respuesta detectada por el transductor resulta del término de Coriolis presente en sus ecuaciones de movimiento ("fuerza de Coriolis").

Los giroscopios de estructura vibrante son más simples - y económicos, que los giroscopios de rotación convencionales. Los dispositivos de estado sólido que usan este principio son un tipo económico de indicadores de posición. La figura 8 muestra su funcionamiento:

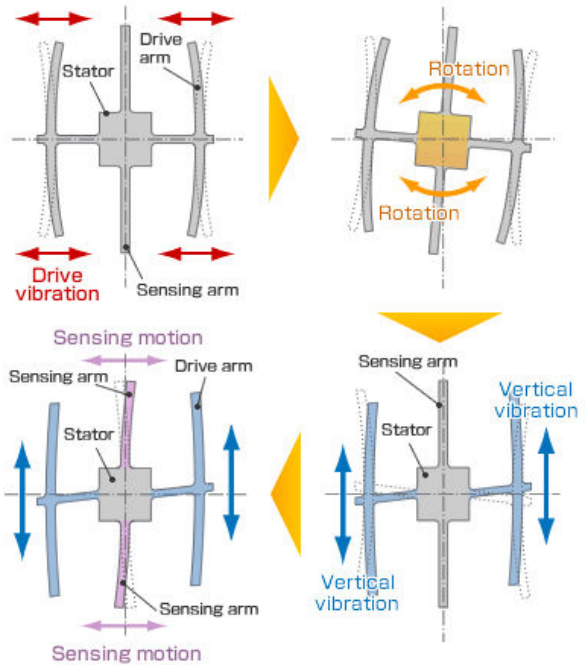


Figura 8: Funcionamiento de un giroscopio MEMS

1. Normalmente, un brazo de accionamiento vibra en una dirección determinada.
2. Se aplica una rotación
3. Cuando se hace girar el giroscopio, la fuerza de Coriolis actúa sobre los brazos de accionamiento, produciendo vibración vertical.
4. La parte fija se dobla debido a la vibración vertical del brazo de accionamiento, y produce un movimiento en los brazos de detección.
5. El movimiento de los de brazos de detección produce una diferencia de potencial a partir del cual se detecta la velocidad angular. La velocidad angular se convierte en una señal eléctrica.

3.1.2 Acelerómetros

Los acelerómetros electrónicos permiten medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones, esto es, en tres direcciones del espacio ortonormales. Esta

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

característica permite medir la inclinación de un cuerpo, puesto que es posible determinar con el acelerómetro la componente de la aceleración provocada por la gravedad que actúa sobre el cuerpo.

Un acelerómetro también es usado para determinar la posición de un cuerpo, pues al conocerse su aceleración en todo momento, es posible calcular los desplazamientos que tuvo. Considerando que se conocen la posición y velocidad original del cuerpo bajo análisis, y sumando los desplazamientos medidos se determina la posición.

3.1.3 MEMS

Hay muchas formas de construir un acelerómetro de forma mecánica o electrónica. Estos incluyen piezoelectricos, piezoresistivos, resonantes, capacitivos y de gas y liquido calentado. En todos estos acelerómetros una combinación de un tamaño pequeño, bajo consumo, alta sensibilidad y un coste reducido son deseados para la mayoria de las aplicaciones. La mayoría de los acelerómetros fabricados hoy en día son MEMS *(Microelectromechanical systems)* y básicamente consisten en dos tipos: capacitivos y térmicos. Acelerómetros capacitivos representan un gran número de aplicaciones del acelerómetro, sin embargo los tipos térmicos han hecho importantes incursiones en la electrónica de consumo, juguetes, electrodomésticos, industriales, automoción, herramientas de mano portátiles, y los mercados militares y aeroespaciales, debido a su pequeño tamaño, robustez y bajo coste.

Los acelerómetros térmicos no tienen partes móviles, y por eso son más robustos. Calientan un gas y durante una aceleración, el gas caliente se mueve en la dirección del movimiento, empujado por el gas frío, que es de mayor densidad[2]. En la figura 9 se muestra su funcionamiento.

3.1.4 Integración de sistemas

El filtro de Kalman está provisto de un algoritmo simple que puede prestarse fácilmente a los sistemas integrados y solo requiere de un modelo estadístico adecuado de las variables de estado y ruidos asociados para optimizar el rendimiento. Este hecho lleva a un uso amplio en aplicaciones asistidas por la inercia.

La integración de los GPS con un sistema de navegación inercial (INS) y un filtro de Kalman proporcionan un resultado global mejorado en toda la navegación. Esencialmente, el INS proporciona errores

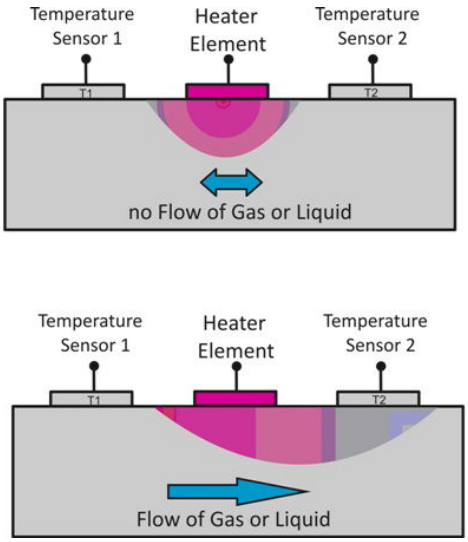


Figura 9: Acelerómetro térmico MEMS

casi nulos que se suman lentamente con el tiempo. El GPS tiene un error mínimo pero con mucho más ruido. El Filtro de Kalman, usando los modelos estadísticos de ambos sistemas, puede aprovechar las características de los diferentes errores y minimizar optimamente sus tendencias.

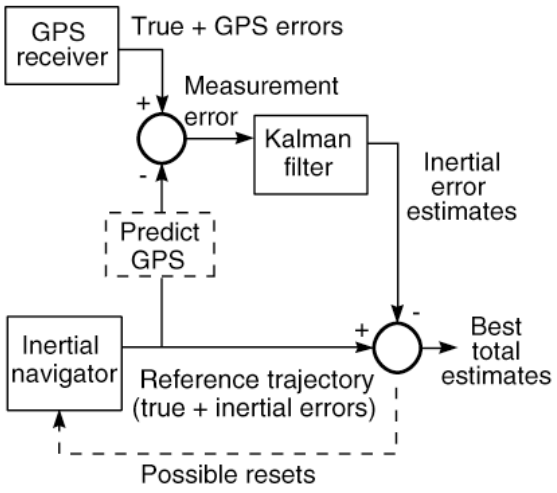


Figura 10: Funcionamiento del filtro Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo lineal y asume que el proceso que genera las mediciones es también lineal también. Porque la mayoría de los sistemas y procesos (incluso GPS y INS) son no lineales, se necesita un proceso de referencia ya conocido para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

utilizarlo como método de linealización.

La figura 10 ilustra la solución para integrar GPS y navegadores inerciales. Note que los valores verdaderos de cada sistema se cancelan mutuamente cuando se miden en el filtro Kalman en el que solo el GPS y los errores inerciales necesitan ser modelados. La trayectoria de referencia, se espera sea lo suficientemente cercano a lo verdadero de tal forma que los modelos de error sean lineales y el filtro Kalman sea óptimo. Para la mayoría de las aplicaciones del GPS este es el caso.

Hay 3 tipos de arquitectura para la integración GPS/INS: Desacoplada, acoplamiento flexible y fuertemente acoplada. Ya que en este articulo estamos analizando las posibilidades para un PAS, que durante la mayoría del tiempo estará debajo de la superficie del agua, y sin recepción GPS, la opción más adecuada será la arquitectura desacoplada. De esta forma solamente usa el GPS cómo dispositivo auxiliar para determinar su posición en el momento en que se encuentra en la superficie.

3.2 Comparación

Existen una multitud de Unidades de Medidas Inerciales en el mercado. Cada uno con un método de funcionamiento y precisión, de 3, 6, 9 e incluso 10 grados de libertad (GDL). Existen tantos que sería imposible mostrarlos todos, por eso se hace una comparación de 3 tipos; una de alta gama (superior a 10k$), una de gama media (alrededor de 5k$) y la ultima de gama baja (menos de 500$).

El UMI que se ha escogido de la gama alta es el *Spatial FOG* de *Advanced Navigation*[7] (Figura 11) que tiene unas dimensiones de 90x90x95 mm y un peso de 665 gramos y combina un giroscopio de fibra óptica con 3 acelerómetros, 3 magnetómetros y GPS para tener 10 grados de libertad. Su precio estimado es de unos 35.000$. Su consumo es de 550mA a 12V, o sea 6.6 vatios.

Sus principales características de precisión son:

- Horizontal: 0.8m
- Vertical: 1.5m
- Horizontal(con SBAS): 0.5m
- Vertical(con SBAS): 0.8m
- Horizontal(con RTK): 0.008m
- Vertical(con RTK): 0.015m
- Velocidad: 0.007 m/s

Figura 11: *Spatial FOG* de *Advances Navigation*

- Balanceo y cabeceo: 0.01º
- Rumbo: 0.05º

El modelo de gama media es el *IG-500N* de *SBG Systems*[8] (Figura 12). Cuesta unos 3500$. En este caso contiene 3 giroscopios, 3 acelerómetro, 3 magnetómetros un sensor de temperatura, un sensor de presión y un receptor de GPS y está compuesto completamente por módulos MEMS. El peso es de 44 gramos, mide 49x36x22 mm y el consumo es de 800mW a 5V. El modelo estándar tiene las siguientes características:

Figura 12: *IG-500N* de *SBG Systems*

- Balanceo y cabeceo: 0.35º
- Rumbo: 1º

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Velocidad: 0.1 m/s
- Posición: < 2m

Y por último el modelo de gama baja, el *GP9* de *CH Robotics* [9] (Figura 13). Es un modulo muy reducido, que solamente pesa 11 gramos y con unas dimensiones de 38x33x13 mm. Tiene un consumo de menos de 150mA a 5V buscando señal de GPS y una vez fijada, consume menos de 100mA a 5V, que equivale respectivamente a 750 y 500mW. No tiene una carcasa, pero montado en el PAS tampoco es necesario. Los principales especificaciones son:

Figura 13: *GP9* de *CH Robotics*

- Precisión estática: 1º
- Precisión dinámica: 3º
- Rango Giro: 2000 º/s
- Rango Acelerómetro: 8 g

3.3 Conclusión

Visto la enorme diferencia en productos ofrecidos, es complicado escoger un modelo que sirve para todas las aplicaciones.Por lo tanto el modelo más simple, mas económico y que tenga un mayor ahorro de energía además de un tamaño reducido, lo hace el más adecuado, porque un PAS no necesita saber su rumbo exacto en todo momento y teniendo una idea general de su posición y rumbo es más que suficiente, por todo esto, el sensor escogido para la navegación submarina del PAS, es el acelerómetro térmico MEMS.

4 Conclusiones Generales

Para finalizar el presente artículo, hemos hecho una revisión completa a dos de los aspectos más importantes del PAS, su flotabilidad/movimiento, su deslizamiento en el agua y su posicionamiento, dos aspectos claves en el éxito o no de la misión de un PAS, pues este sin saber por dónde va o como rectificar su posición si fuera necesario y sin variar la flotabilidad para conseguir desplazarse por el agua, no podría realizar ninguna de las misiones para las que se puede diseñar un PAS: control de fauna y flora marina, niveles de clorofila en los bancos de algas, toma de fotografías del fondo marino, detección de sustancias químicas, etc. Por tanto, podemos afirmar, que de una buena elección de los componentes en estos dos aspectos puede ser la diferencia entre el éxito o no de la misión, y además dependiendo de la finalidad del PAS, convendría escoger una configuración u otra.

Agradecimientos

El presente proyecto de investigación ha sido financiado como Proyecto de Investigación ENE2010-21711-C02-01 por el MICINN español. Las empresas ValenciaPort (Autoridad Portuaria de Valencia), Ingeteam Service S.A., Real Club Naútico de Valencia están colaborando activamente en el desarrollo del mismo.

Referencias

[1] Eriksen, C.C. et al., Oct 2001, "Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.26, no.4, pp.424-436, http://dx.doi.org/10.1109/48.972073

[2] Fennelly, J. et al. 2013, Thermal MEMS Accelerometers Fit Many Applications, Sensor Magazin 3, pp.18-20

[3] Gernot, Cyrille, September 2007, "GPS Signal Disturbances by Water in Various States," Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, pp. 2187-2195.

[4] Hyakudome, T. 2002, Buoyancy Control for Deep and Long Cruising Range AUV, Proceed-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference

[5] Sherman, J. et al., Oct 2001, "The Autonomous Underwater Glider Spray" IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.26, no.4, pp.437-446, http://dx.doi.org/10.1109/48.972076

[6] Stommel, H. 1989, The Slocum Mission, Oceanography 2(1): 22-25, http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.1989.26

[7] http://www.advancednavigation.com.au/product/spatial-fog

[8] http://www.sbg-systems.com/products/ig500n-miniature-ins-gps

[9] http://www.chrobotics.com/shop/gp9-ahrs

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SOLAR DESALINATION MANAGEMENT TO FULFILL GREENHOUSE WATER DEMAND USING PREDICTIVE CONTROL

Lidia Roca[1]
[1]CIEMAT - Plataforma Solar de Almería, ctra. de Senés km. 4,5 Tabernas (04200) Almería, lidia.roca@psa.es

Jorge A. Sánchez[2], Francisco Rodríguez[2], Javier Bonilla[3]
[2] Universidad de Almería, ctra. Sacramento s/n, (04120) Almería, {jorgesanchez,frrodrig}@ual.es
[3] CIEMAT - Plataforma Solar de Almería, javier.bonilla@psa.es

Abstract

This paper proposes a control strategy for a solar desalination plant included in a micro-grid framework. The goal of the controller is to maintain a volume of distillate despite the water demanded by a greenhouse and taking into account solar irradiance disturbances. In a top layer, the temperature setpoints are calculated to assure enough energy and reach the water requirements. NMPC is used to estimate the optimal solar field setpoints and a PI controller to choose the setpoint for the distillate unit. In a second layer, these two temperatures are controlled by the solar field pump and by a three-way regulation valve respectively. Simulation results are included to compare the proposed strategy with an open-loop operation.

Keywords: NEPSAC, feedback linearization, multi-effect plant.

1 INTRODUCTION

Modern agricultural systems are characterized by the intensive and optimal use of land and water, turning agricultural exploitation into a semi-industrial concept. Greenhouses are systems suitable both for zones with unfavorable climatic conditions - allowing crop growth regardless of the ambient temperature, and for regions with less restrictive weather - with the aim in this case of increasing crop productivity and improving fruit quality. The greenhouse environment is ideal for farming because these variables can be manipulated to achieve optimal growth and plant development. This manipulation requires energy consumption, depending on the crop's physiological requirements and, additionally, depending on the production patterns adopted for yield quantity and timing. Crop growth is primarily determined by climatic variables of the environment and the amount of water and fertilizers applied through irrigation. Therefore, controlling these variables allows the control of the growth. The productivity optimization through efficient and adequate irrigation is a basic objective in those countries with water limitations. Furthermore, this resource limitation is made worse due to the recent rapid expansion of the surface area occupied by greenhouses in the Mediterranean Basin. Consequently, this has also led to water becoming a more important consideration in the sustainability of the greenhouse-based system in south-eastern Spain. This water deficit has been progressively depleting the aquifers in the area [19]. Eighty per cent of the irrigation water used in Almería (Spain) comes from underground sources, leading to localized overexploitation of aquifers [7]. Over the last few years, as in other arid and semi-arid areas of the world, it has been promoted the use of alternative water sources such as purified water, rain and condensed water collection as a secondary source, the reuse of drainage water, the development of new technologies related to water-use efficiency such as advanced irrigation controllers, and sea water desalination.

In this line, the idea of integrating solar desalination systems in the agricultural environment has been significantly considered with the aim of dealing with water limitations in some regions of the planet. One of the most simple and cheap techniques, the solar stills [10], can be easily combined with greenhouses [4]. This kind of distillation processes are usually located on the roof of greenhouses where a glass system is installed. Seawater is pumped to this cover where vapor is produced and raised by natural convection to the top glass where it condenses. The water falls down the roof being finally collected. As explained in [4], water produced by a solar still is not enough for growing a crop. Moreover, operational reasons, such as salt accumulation, have lead to the non real applicability of this method. A relative new concept is the use of seawater for cooling and humidification [8]. The purpose is to create adequate temperature conditions for the crops. Solar energy is used in an evaporation process to humidify water. The process is explained in [12]. The air inside the

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

greenhouse is cooled due to a first evaporator located at the front wall of the greenhouse. The air passes through the crops and reaches a second evaporator with hot water flowing inside it. Therefore, the air becomes hotter and more humid. This air passes finally through a condenser obtaining water from the air stream. Based on this concept, a new design has been recently proposed [27] which includes an improved solar water heater.

This paper deals with a different combination of greenhouse and solar desalination. It consists in taking advantage of the water produced in a solar multi-effect desalination, MED, plant to feed a greenhouse located in the southeast of Spain. The challenge is to properly operate the desalination plant to produce the daily water demanded by the crop.

Most of the optimization algorithms applied to desalination processes deal with the design of cogeneration plants [9, 18, 23, 26]. The objective function includes thermodynamic and environmental issues. However, few optimization problems are focused on satisfying a variable water demand. In [22], for example, a nonlinear programming, NLP, problem is defined to reduce operating costs in a reverse osmosis, RO, system. The outputs of the optimization are the number of membranes used in the operation, the feed pressure and the flow.

In the present paper a Nonlinear Model Predictive Control, NMPC, is applied to find a proper temperature setpoint in a solar field coupled to a desalination process. The idea is to maintain a desired volume of distillate obtained with a MED unit despite the water consumption by irrigation in a greenhouse.

2 CASE STUDY

The case study explored in this paper is a microgrid framework in which two interconnected plants must be managed; a greenhouse and a solar desalination plant (see Fig.1). On one hand, the greenhouse daily demands fresh water for irrigation purposes and, on the other hand, a solar desalination plant produces distillate water in a multi-effect distillate unit. An intermediate storage tank is assumed to be located between the production process and the consumer system.

2.1 SOLAR DESALINATION FACILITY

The desalination plant used in this study is the AQUASOL system sited at Plataforma Solar de Almería in the southern of Spain. This pilot plant includes a MED unit coupled with a solar collector

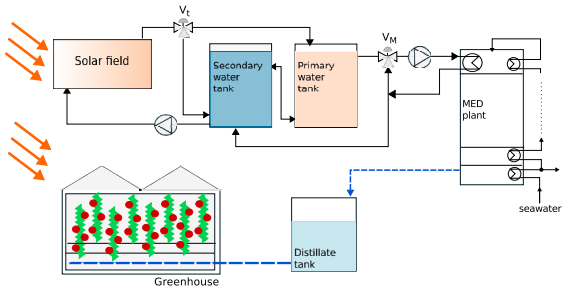


Figure 1: Solar desalination plant coupled with a greenhouse.

field[1]. As shown in Fig.1, seawater is pumped towards the first cell effect (or heater) of the MED. There, part of the water is evaporated and the rest of the seawater goes down to the following cells by gravity (a detailed description of the MED unit can be found in [11]). The required heat for the heater is provided by the solar field that supplies energy to the storage system (two 12 m^3 water storage tanks). A three-way regulation valve, V_M, is used to reach the nominal temperature at the inlet of the first effect, by mixing water from the primary tank with that returned from the heater. When the solar field temperature exceeds the one in the primary tank, the on-off valve position, V_t, is changed to connect these components. Otherwise, the solar field should be connected to the bottom part of the secondary water tank to avoid cooling down the primary water tank.

2.2 GREENHOUSE ENVIRONMENT

The research data used in this work have been obtained from greenhouses located in the Experimental Station of the Cajamar Foundation, El Ejido, in the province of Almería, Spain ($2^o43'$ W, $36^o48'$ N, and at a 151-m elevation). The tomato crops are grown in a multi-span "Parral-type" greenhouse (Fig.2). The greenhouse has a surface area of 877 m^2 (37.8 x 23.2 m) with a polyethylene cover. The daytime air temperature and humidity are managed using the top and side windows which are controlled via a PI controller [17]. In addition, the biomass-based heating system allows one to control the night-time air temperature [20]. Setpoints for both systems are established at 24 °C, and 10 °C for the ventilation and heating, respectively. Throughout the experiments, the following inside climatic variables were continuously monitored: air temperature and relative humidity (Vaisala HMP45A), solar radiation (Delta-Ohm LP PYRA 03), and photosynthetic

[1] Although the system was designed to operate also with fossil energies [1], this work only deals with the solar operation mode.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figure 2: Greenhouse facilities used for the experiences performed in this work. From left to right and from top to bottom: Greenhouse, Dropper, Solar and PAR radiation device at the outside, Irrigation system, Solar and PAR radiation device inside the greenhouse, and the tomato crop lines.

active radiation (PAR, Kipp&Zonen PAR-Lite). Outside the greenhouse a meteorological station was installed, in which air temperature, relative humidity, solar and photosynthetic active radiation, rain detection, wind direction, and velocity measurements were taken. The crop was grown in coconut coir bags with six plants and three droppers each. The irrigation is automated by a demand tray, which is formed by two crop bags. Drainage water is set at 20 % volume. All data are recorded every minute with a personal computer.

3 SOLAR DESALINATION PLANT MODEL

The model of the solar desalination plant is divided in three main components; the solar field, the storage system and the MED unit. Fig.3 shows a diagram with the connections between these models. A description of the variables involved is included in Table 1.

The solar field has been characterized using a concentrated parameter model based on energy balance, and the storage tanks have been characterized with models based on energy and mass balances. A description of these dynamic models can be found in [16]. With the aim of reducing the computational time of the whole model, a first-order model has been experimentally obtained to predict the distillate production (the distillate flow rate, q_d) as a function of the inlet MED temperature, T_{iM}, and mass flow rate, $\dot{m}_M$,:

$$q_d(s) = \frac{0.07}{120s+1}e^{-100s}T_{iM}(s) + \frac{0.021}{60s+1}e^{-40s}\dot{m}_M(s) \quad (1)$$

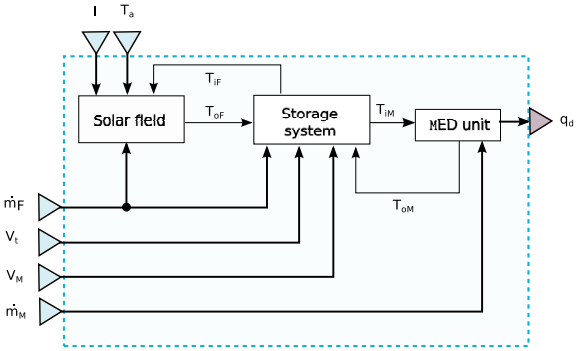


Figure 3: Connection between the submodels of the solar desalination plant.

Symbol	Description		Units
D	Volume of water in the distillate tank		$[m^3]$
I	Irradiance		$[W/m^2]$
$\dot{m}$	Mass flow rate		[kg/s]
t_m	Sampling time		[s]
T	Temperature		[°C]
q	Volumetric flow rate		$[m^3/h]$
Sub.	Description	Sub.	Description
0	Initial value	a	Ambient
d	Distillate	F	Solar field
i	Inlet	M	MED
o	Outlet	p	Primary tank
Superscript		Description	
$*$		Setpoint	

Table 1: Nomenclature

4 CONTROL SYSTEM

The idea behind the controller proposed in this section is to maintain a desired volume of distil-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

late, D^*, by regulating the temperatures in the solar field and in the MED heater.

This controller (see Fig. 4) includes two loops:

- Loop 1: To reach the desired distillate demand, the solar field must deliver enough thermal energy. A NMPC is used to solve an optimization problem, calculate a reference for the outlet solar-field temperature and assure the required distillate production. This controller must be applied over the temperature instead of the water flow rate to include the following constraints:

$$1\,^{\circ}\mathrm{C} \leq T^*_{oF} - T_{iF} \leq 20\,^{\circ}\mathrm{C}, \quad (2)$$

$$T_p \leq T^*_{oF} \leq 95\,^{\circ}\mathrm{C}. \quad (3)$$

  The solar-field outlet-inlet temperature difference must be lower than 20 °C to avoid stress in the absorber tubes, a minimum temperature difference must be guaranteed to avoid cooling down the water, T_{oF} must be under 95 °C to avoid evaporation and it should be higher than T_p to not to cool down the stored water.

  The outlet solar-field temperature, T_{oF}, may be controlled by varying the solar-field water mass flow rate, $\dot{m}_F$. Several algorithms have been tested in this plant, obtaining successful results [2, 13, 14, 15, 25, 21]. In this case, a feedback linearization control, FLC, is used [13].

- Loop 2: Since the distillate production depends mainly on the thermal energy delivered to the first effect, if nominal conditions are assumed in the MED mass flow rate, $\dot{m}_M$, a controller in T_{iM} is required to reach the desired demand. For this purpose, two consecutive PI's are included. The first one calculates a reference temperature for the MED inlet water, T^*_{iM}. This temperature is controlled with the second PI using the aperture of valve V_M as control variable.

  Notice that there is a maximum temperature, to avoid scale formation in the heater, 72 °C.

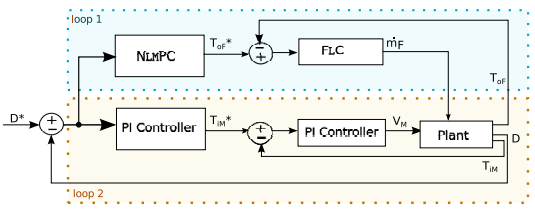


Figure 4: Control scheme

A minimum temperature is also defined to assure a minimum distillate production: 55 °C $\leq T^*_{iM} \leq$ 72 °C.

4.1 NONLINEAR MPC

Model predictive control, MPC, is a typical control methodology that uses a model of the process to estimate the outputs at future time values $\hat{y}(t+k|t)$ and calculate the optimal future inputs. In general, MPC algorithms consist of applying a control sequence that minimizes a cost function:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+k|t) - \omega(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2, \quad (4)$$

where ω is the reference signal, Δu is the control effort obtained from cost function minimization, N_1 is the minimum prediction horizon, N_2 is the maximum prediction horizon, N_u is the control horizon and $\delta(j)$ and $\lambda(j)$ are weighting sequences that penalize future tracking errors and control efforts, respectively, along the horizons.

Although most of the MPCs are applied to linear models, some techniques have been developed to obtain the future control actions using a nonlinear model of the process [3]. In this work, the NEPSAC approach has been chosen [5] because it uses directly the nonlinear prediction model without local linearization and it solves the optimization problem in a low computational time. The idea behind this technique is to use the nonlinear model to predict the base response and the step response.
For lineal systems, the superposition principle is valid:

$$y(t+k|t) = y_{base}(t+k|t) + y_{opt}(t+k|t), \quad (5)$$

where $y_{base}(t+k|t)$ is the effect of a base control sequence, and $y_{opt}(t+k|t)$ is the effect of the optimized future control actions. This second component is the result of unit impulse (h_i) and step responses (g_i):

$$y_{opt}(t+k|t) = h_k\Delta u(t|t) + h_{k-1}\Delta u(t+1|t) + ... + g_{k-N_u+1}\Delta u(t+N_u-1|t). \quad (6)$$

Using matrix notation, the vector of outputs is,

$$\mathbf{Y} = \bar{\mathbf{Y}} + \mathbf{G}\mathbf{U}, \quad (7)$$

where $\bar{\mathbf{Y}}$, is the vector of base response outputs from $t+N_1$ through $t+N_2$, $\mathbf{U}$ is the vector of future controls up to $t+N_u-1$ and $\mathbf{G}$ is the (N_2-N_1+1)xN_u matrix with impulse and step

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

response coefficients. Minimizing the cost function 4, a closed form solution can be obtained for the unconstrained case [6]:

$$\mathbf{U}^* = (\mathbf{G^T G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G^T} (\mathbf{R} - \bar{\mathbf{Y}}). \quad (8)$$

The control input applied to the plant is,

$$u^*(t) = u_{base}(t|t) + \Delta u(t|t) = u_{base}(t|t) + \mathbf{U}^*(1). \quad (9)$$

In the case of nonlinear systems, since the superposition principle is no longer valid, the NEPSAC approach proposes to find iteratively a control input $u_{base}(t+k|t)$ as close as possible to $u^*(t+k|t)$ so that $y_{opt}(t+k|t) \approx 0$ and the superposition principle is not involved. The procedure is the following one:

1. choose an initial $u_{base}(t+k|t)$, for example $u_{base}(t+k|t) = u^*(t+k|t-1)$,
2. calculate $\Delta u(t+k|t)$ as explained for the linear case,
3. if $|\Delta u(t+k|t)| < \varepsilon$, where ε is close enough to zero, then $u^*(t+k|t) = u_{base}(t+k|t) + \Delta u(t+k|t)$ and the suboptimal control input is $u^*(t+k|t)$, otherwise make $u_{base}(t+k|t) = u^*(t+k|t) + \Delta u(t+k|t)$ and go to step 2.

4.2 FEEDBACK LINEARIZATION CONTROL

The purpose of feedback linearization control is to transform a nonlinear system into a linear one using a nonlinear feedback that makes up for nonlinearities in system behavior [24]. This technique was applied to AQUASOL solar field to track a desired temperature reference using the water mass flow rate as the control signal [13]. Since experimental results showed successful results, this controller has been used in this work to follow the optimal references estimated by the NMPC.

4.3 PI CONTROLLERS

The second loop includes two PI controllers with anti-windup. The first one is used as a reference governor to choose the inlet MED temperature setpoint, T^*_{iM}. The parameters of this controller are: K_p=20 °C/m^3, T_i=1200 s and T_t=15 s. The temperature setpoint obtained with this controller is reached using another PI controller that regulates the valve aperture, V_M. In this case, the parameters are: K_p=−2 %/°C, T_i=60 s and T_t=8 s.

5 SIMULATION RESULTS

In this section, a simulation is included to demonstrate the advantages of using the controllers to calculate the solar-field and MED temperature setpoints. The results are compared with the case of using these setpoints fixed at 72℃ (which is the maximum value considered as input in the MED unit).

With the aim of scaling the greenhouse water consumption to a real case, 6 greenhouses have been considered in the simulation. Therefore, the real consumption values obtained from the greenhouse have been multiplied for 6. Taking into account that typical daily consumption is around 1.3 m^3, and assuming two days of storage capacity in case of cloudy days, the setpoint in the distillate volume has been established to $D^* = 6 \cdot 1.3 \cdot 2 = 15.6\,\mathrm{m}^3$.

The NMPC strategy was tested using the following tuning parameters: $t_m = 300$ s, $N_1 = 1$ s, $N_2 = 600$ s, $\delta = 0$ and $\lambda(j) = 10^{-6}$.

5.1 A TYPICAL OPERATION DAY

In this example the aim is to observe the controller response when the output is near the reference level. Real irradiance and water consumption are depicted in Fig.5, besides the volume of distillate obtained both with the controller and the open loop case.

At the beginning of the simulation, NMPC predicts that the optimal temperature reference is the minimum one (see Fig.6 (a)). Although the water mass flow rate is saturated at its maximum value (Fig.6 (c)) trying to follow the reference, the setpoint is not feasible with those conditions. Before reaching the distillate reference, T^*_{oF} starts to increase and $\dot{m}_F$ decreases. Therefore, distillate production is slightly reduced because less thermal power is being delivered to the storage system. Nevertheless, at time 50506 s, the greenhouse irrigation system is turned on and the volume of stored distillate drastically decreases. For this reason, the optimal values obtained with NMPC are again near the minimum one. This procedure is repeated until the end of the simulation. For the open-loop case, $\dot{m}_F$ is saturated for most part of the time (Fig.6 (d)) trying to follow the temperature setpoint (Fig.6 (b)).

The second control loop is shown in Fig.7. Whereas the MED setpoint is fixed for the case of the open-loop case (Fig.7 (b)), this value varies continually ((Fig.6 (a)) when the controller is applied and the volume of distillate is near the desired value. The aperture of the valve decreases when more water coming from the primary tank is needed to reach the desired temperature at the inlet of the MED unit.

Electricity consumption in the solar-field water

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

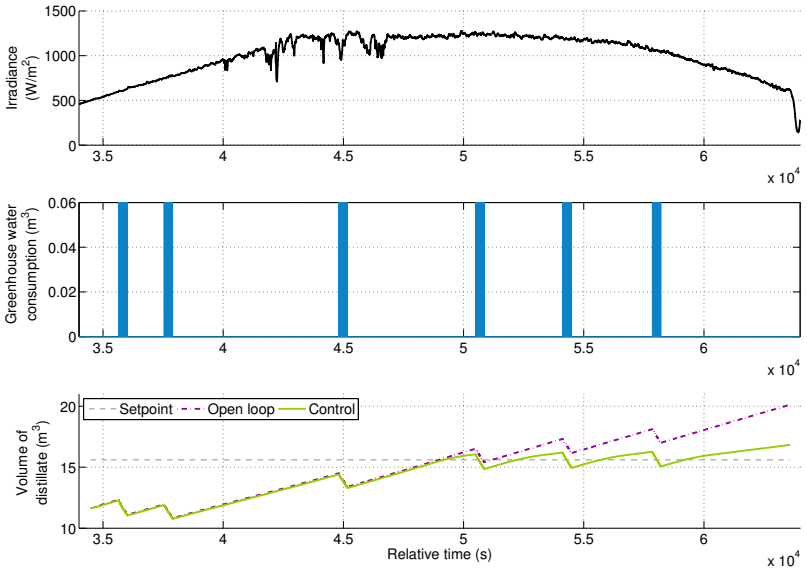


Figure 5: Irradiance and volume of distillate in a typical operation day.

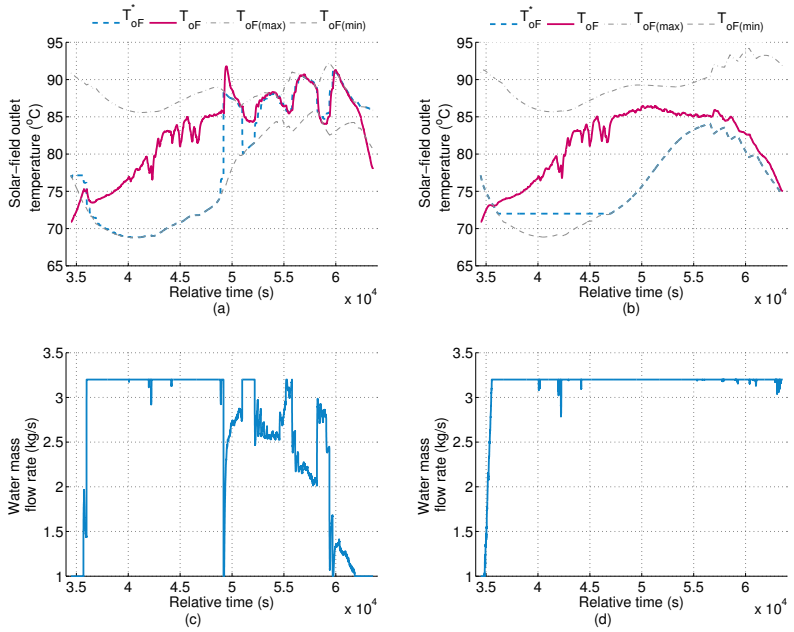


Figure 6: Solar-field temperature and water mass flow rate in a typical operation day. Control case (a) and (c). Open loop case (b) and (d).

pump is reduced as a consequence of using the controller to properly choose the setpoint values to maintain a desired volume in the distillate tank. Since less water flow rates are required, the pump is working at lower power levels which reduces the electricity costs.

6 CONCLUSIONS

For a specific greenhouse demanding water for irrigation purposes, to use distillate from a solar facility is a feasible process that must be controlled. The use of appropriate control techniques could not only assure the water demand, but also reduce electricity costs. The simulations shown in

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

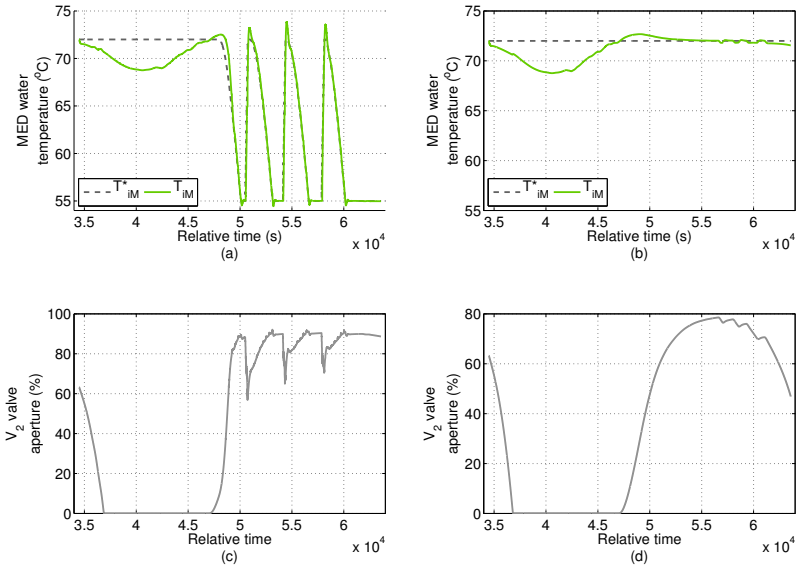


Figure 7: MED temperature and V_2 valve aperture in a typical operation day. Control case (a) and (c). Open loop case (b) and (d).

this paper deal only with a typical operating day, but more simulations are required to evaluate the cost throughout one year taking into account water dependence of crops along the different seasons. Future works will also include a model of the greenhouse water consumption that will be used with two main purposes: i) use it as a load simulator for an experimental campaign in the solar desalination facility to evaluate the controller explained in this paper, ii) include it in the NMPC cost function to improve the estimations of the future control actions (the solar field temperature setpoints).

Acknowledgments

This work has been funded by project DPI2010-21589-C05-02 financed by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and ERDF funds and by the Controlcrop Project, P10-TEP- 6174, project framework, supported by the Andalusian Ministry of Economy,Innovation and Science (Andalusia, Spain).

References

[1] D. Alarcon-Padilla, J. Blanco-Gálvez, L. García-Rodríguez, W. Gernjak, and S. Malato. First experimental results of a new hybrid solar/gas multi-effect distillation system: the AQUASOL project. *Desalination*, 220(1-3):619–625, 2008.

[2] C. O. Ayala, L. Roca, J. L. Guzman, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel, and L. J. Yebra. Local model predictive controller in a solar desalination plant collector field. *Renewable Energy*, 36(11):3001–3012, 2011.

[3] E. F. Camacho and C. Bordons. *Model predictive control*. Springer, 2013.

[4] M. T. Chaibi. An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas. *Desalination*, 127(2):119–133, 2000.

[5] R. De Keyser. Model based predictive control. *UNESCO Encyclopaedia of Life Support Systems (EoLSS)*, 2003.

[6] A. Dutta, R. De Keyser, and I. Nopens. Robust nonlinear extended prediction self-adaptive control (nepsac) of continuous bioreactors. In *20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pages 658–664. IEEE, 2012.

[7] M. D. Fernández, A. M. González, J. Carreno, C. Párez, and S. Bonachela. Analysis of on-farm irrigation performance in mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management*, 89(3):251 – 260, 2007.

[8] M. F. A. Goosen, S. S. Sablani, C. Paton, J. Perret, A. Al-Nuaimi, I. Haffar, H. Al-Hinai, and W. H. Shayya. Solar energy desalination for arid coastal regions: development

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

of a humidification–dehumidification seawater greenhouse. *Solar energy*, 75(5):413–419, 2003.

[9] S. R. Hosseini, M. Amidpour, and S. E. Shakib. Cost optimization of a combined power and water desalination plant with exergetic, environment and reliability consideration. *Desalination*, 285:123–130, 2012.

[10] C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos. Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19:136–163, 2013.

[11] P. Palenzuela, D. Alarcón, J. Blanco, E. Guillén, M. Ibarra, and G. Zaragoza. Modeling of the heat transfer of a solar multi-effect distillation plant at the Plataforma Solar de Almería. *Desalination and Water Treatment*, 31(1-3):257–268, 2011.

[12] P. Paton, C.and Davies. The seawater greenhouse cooling, fresh water and fresh produce from seawater. In *The 2nd International Conference on Water Resources in Arid Environments, Riyadh*, 2006.

[13] L. Roca, M. Berenguel, L. Yebra, and D. Alarcón-Padilla. Solar field control for desalination plants. *Solar Energy*, 82:772–786, 2008.

[14] L. Roca, J. L. Guzman, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel, and L. J. Yebra. Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field. *Control Engineering Practice*, 17(9):1076–1088, 2009.

[15] L. Roca, J. L. Guzman, J. E. Normey-Rico, M. Berenguel, and L. J. Yebra. Filtered Smith predictor with feedback linearization and constraints handling applied to a solar collector field. *Solar Energy*, 85(5):1056–1067, 2011.

[16] L. Roca, L. J. Yebra, M. Berenguel, and D. Alarcon-Padilla. Modeling of a Solar Seawater Desalination Plant for Automatic Operation Purposes. *Journal of Solar Energy Engineering*, 130(4):041009–1–041009–8, 2008.

[17] F. Rodríguez, J.L. Guzmán, M. Berenguel, and M.R. Arahal. Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production. *International Journal of Adaptive Control Signal Processing*, 22:180–187, 2008.

[18] R. Salcedo, E. Antipova, D. Boer, L. Jiménez, and G. Guillén-Gosálbez. Multi-objective optimization of solar rankine cycles coupled with reverse osmosis desalination considering economic and life cycle environmental concerns. *Desalination*, 286:358–371, 2012.

[19] F. Sánchez-Martos, A. Pulido, and J. M. Calaforra. Hydrogeochemical processes in an arid region of europe (almeria, {SE} spain). *Applied Geochemistry*, 14(6):735 – 745, 1999.

[20] J. A. Sánchez-Molina, J. V. Reinoso, F. G. Acién, F. Rodríguez, and J. C. López. Development of a biomass-based system for nocturnal temperature and diurnal co2 concentration control in greenhouses. *Biomass and Bioenergy*, 67:60–71, 2014.

[21] T. Santos, L. Roca, and J. L. Guzman. Practical mpc with robust dead-time compensation applied to a solar desalination plant. In *18th IFAC World Congress*, pages 4909–4914, 2011.

[22] K. M. Sassi and I. M. Mujtaba. Optimal operation of ro system with daily variation of freshwater demand and seawater temperature. *Computers & Chemical Engineering*, 59:101–110, 2013.

[23] S. E. Shakib, S. R. Hosseini, M. Amidpour, and C. Aghanajafi. Multi-objective optimization of a cogeneration plant for supplying given amount of power and fresh water. *Desalination*, 286:225–234, 2012.

[24] J. Slotine and W. Li. *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, 1991.

[25] B. C. Torrico, L. Roca, J. E. Normey-Rico, J. L. Guzman, and L. J. Yebra. Robust Nonlinear Predictive Control Applied to a Solar Collector Field in a Solar Desalination Plant. *Control*, 18(6):1430–1439, 2010.

[26] L. Wu, Y. Hu, and C. Gao. Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power. *Desalination*, 324:111–117, 2013.

[27] M. Zamen, M. Amidpour, and M. R. Firoozjaei. A novel integrated system for fresh water production in greenhouse: Dynamic simulation. *Desalination*, 322:52–59, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración

José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega, Francisco R. Rubio
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
{jalonso9, gbejarano, mortega, rubio}@us.es

Resumen

Este artículo describe el análisis y control de un ciclo de refrigeración de una etapa, en el que dos variables de proceso son controladas simultáneamente: la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador y el grado de sobrecalentamiento del refrigerante a la salida del evaporador. La velocidad de giro del compresor y la apertura de la válvula de expansión son utilizadas como variables de control; por tanto, se trata de un proceso MIMO. Se identifica el sistema en varios puntos de operación y se propone un controlador robusto multivariable H_∞ basado en el Problema de Sensibilidad Mixta S/KS/T. Se incluyen resultados de simulación del controlador robusto en comparación con un controlador PID descentralizado, observando el mejor desempeño del controlador H_∞ y la coherencia de los resultados con las especificaciones de diseño.

Palabras clave: Sistemas de refrigeración, Ciclo de compresión de vapor, Control robusto, Problema de Sensibilidad Mixta H_∞.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de compresión de vapor, véase la Figura 1, es el método más utilizado a nivel mundial para la generación de frío, ya sea para aplicaciones en refrigeración doméstica, comercial, industrial o climatización [15]. La refrigeración supone un alto porcentaje del consumo energético y su impacto económico y medioambiental está bien caracterizado. Por ejemplo, los supermercados constituyen uno de los mayores consumidores del sector energético. Un supermercado típico consume entre 2 y 3 millones de kWh anualmente [1], y en torno al 50 % de esta energía se consume en los procesos de refrigeración. En el caso de edificios de oficinas se ha estimado que el consumo debido al uso de sistemas de acondicionamiento de aire o HVAC (del inglés Heating, Ventilating, and Air Conditioning) está en torno al 20-40 % del consumo de energía total en países desarrollados [14]. Debido a la escasez de los diferentes tipos de energía, el ahorro de la misma se convierte en un aspecto cada vez más urgente de abordar, y en este proceso el desempeño real del controlador juega un papel central.

Como se observa en la Figura 1, un ciclo de refrigeración está formado por un compresor de velocidad variable, una válvula de expansión electrónica y dos intercambiadores de calor (evaporador y condensador). Se extrae energía del recinto a refrigerar (en concreto del fluido secundario en el evaporador) mediante el paso del refrigerante por el mismo y se aporta energía al fluido secundario en el condensador. El principal objetivo del control es mantener la temperatura del recinto a refrigerar en el punto deseado, lo que se refleja en una determinada referencia para la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador ($T_{out,sec,e}$). Como objetivo secundario se pretende producir la potencia frigorífica con el máximo coeficiente de comportamiento (COP), lo que se suele reflejar en una referencia para el grado de sobrecalentamiento del refrigerante a la salida del evaporador (TSH). Las acciones de control son la velocidad de giro del compresor N y la apertura de la válvula de expansión A_v, mientras que los caudales de los fluidos secundarios y sus temperaturas de entrada actúan como perturbaciones al sistema, tal como se observa en la Figura 2.

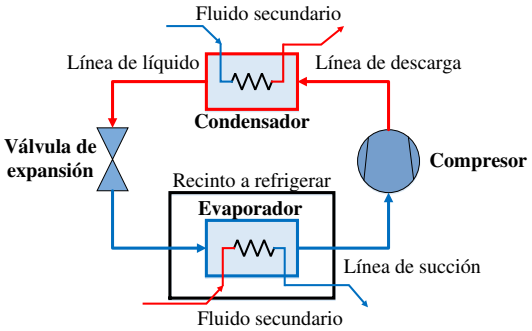


Figura 1: Sistema de refrigeración por compresión

La dificultad de controlar este tipo de proceso reside en las altas inercias térmicas, los tiempos muertos, el alto acoplamiento de las variables del sistema y su carácter fuertemente no lineal.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

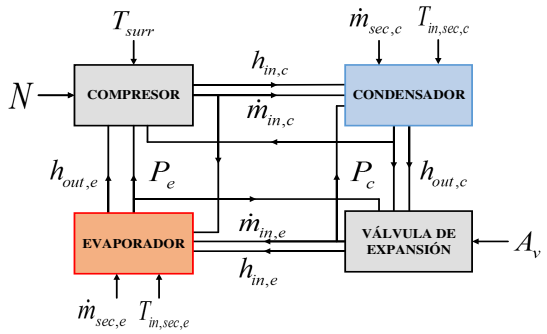


Figura 2: Esquema de las variables de entrada y salida a cada elemento y al ciclo de refrigeración

Las técnicas lineales de control más utilizadas en la literatura son el control descentralizado [10], [24], [23], el control multivariable por desacoplo [21], control LQG [19], [20], [6], control predictivo [16], [5], [18], [17] y control robusto H_∞ [8].

Marchinichen *et al.* [10] han estudiado el uso de una estrategia *SISO* dual para el control simultáneo de la velocidad de giro del compresor N y la apertura de la válvula A_v, en concreto mediante controladores PI. El emparejamiento más utilizado es el de controlar TSH con A_v y $T_{out,sec,e}$ mediante N. Jiangjiang *et al.* [24] implementan un controlador híbrido PID-Redes Neuronales, en el cual la red neuronal ajusta *online* los parámetros de los PIDs. Por su parte, Underwood [23] propone una estrategia de control desacoplado en la que los controladores PID se ajustan de forma conjunta utilizando técnicas de optimización.

En cuanto a la estrategia de control robusto, Larsen *et al.* [8] diseñan un controlador *MIMO* H_∞ que resuelve el problema *S/KS* en el cual se tiene en cuenta que, para su sistema, el acoplamiento entre la temperatura de salida del fluido secundario en el evaporador y la apertura de la válvula de expansión es débil. Se compara el controlador de orden reducido obtenido con un controlador *SISO* H_∞ obtenido relajando la demanda de ancho de banda para el sistema en bucle cerrado.

Siendo conscientes de la complejidad del proceso, podría ser apropiado implementar un controlador que pudiese tener en cuenta el acoplamiento y también las incertidumbres que existen en el modelado lineal, debido a la fuerte no linealidad del proceso. El desarrollo de un controlador robusto parece adecuado a este problema. Este artículo describe uno en particular: un controlador centralizado H_∞ multivariable, basado en el Problema de Sensibilidad Mixta *S/KS/T*.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en el Apartado 2 se describe el modelado del ciclo de refrigeración y sus implicaciones sobre el control. En el Apartado 3 se detalla el procedimiento de síntesis del controlador, mientras que en el Apartado 4 se presentan resultados de simulación que ponen de manifiesto el desempeño del controlador en diferentes puntos de trabajo en comparación con un controlador PID descentralizado. Finalmente en el Apartado 5 se resumen las conclusiones obtenidas y se expresan los trabajos futuros a realizar.

2. MODELADO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

El modelo dinámico empleado se basa en [9], [11], [2], donde se modela de forma independiente cada uno de los componentes del ciclo. Se modela de forma estática el compresor, la válvula de expansión y el comportamiento termodinámico de los fluidos secundarios, mientras que se desarrollan modelos dinámicos para los intercambiadores de calor, debido a que la dinámica del compresor y la válvula suele ser al menos un orden de magnitud más rápida. En el caso del evaporador y el condensador se definen diversos modos de funcionamiento, dependiendo de las condiciones entálpicas del refrigerante a la entrada y salida del intercambiador. Así, los modos de funcionamiento del evaporador se distinguen por la existencia (modo 1) o no (modo 2) de vapor sobrecalentado a la salida del mismo. Los 5 modos de funcionamiento del condensador se diferencian según las condiciones entálpicas del refrigerante a la entrada y a la salida del mismo, siendo el modo 1 aquel en el que el refrigerante está en condiciones de vapor sobrecalentado a la entrada y líquido subenfriado a la salida.

Debido a requerimientos tecnológicos, especialmente en el compresor cuyo fluido de entrada no debe ser bifásico en ningún momento, es deseable que tanto el evaporador como el condensador funcionen en su modo 1. En la Figura 3 se muestra una vista en el espacio de entradas manipulables de las combinaciones de entradas que conducen en régimen permanente a este modo de funcionamiento combinado.

En el espacio definido por la Figura 3 se han seleccionado una serie de puntos de trabajo, en los cuales se ha simulado la respuesta temporal de las variables de salida del sistema ante escalones de magnitud adecuada en las variables manipulables. En la Tabla 1 se muestran los puntos de trabajo considerados.

En cada uno de los puntos de funcionamiento seleccionados y a partir de la evolución de las varia-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

bles de salida se ha identificado un modelo lineal simplificado que relaciona dichas salidas con las variables manipulables. Cada modelo se expresa en forma de matriz de transferencia en continuo tal como se recoge en la Ecuación (1).

$$\begin{bmatrix} \Delta TSH(s) \\ \Delta T_{out,sec,e}(s) \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} \Delta N(s) \\ \Delta A_v(s) \end{bmatrix}$$
$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}(s+z_{11})}{(s+p_{111})(s+p_{112})} & \frac{k_{12}(s+z_{12})}{(s+p_{121})(s+p_{122})} \\ \frac{k_{21}(s+z_{21})}{(s+p_{211})(s+p_{212})} & \frac{k_{22}(s+z_{22})}{(s+p_{221})(s+p_{222})} \end{bmatrix} \quad (1)$$

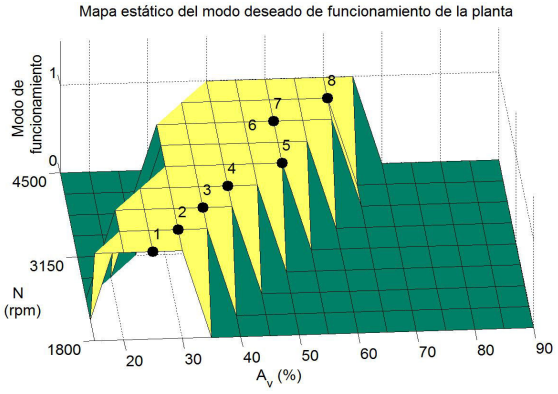


Figura 3: Vista combinada de modo 1 en el evaporador y condensador

Tabla 1: Puntos de trabajo seleccionados en el espacio de entrada.

Punto de trabajo	N**(rpm)**	A_v**(%)**
Punto 1	1800	25
Punto 2	2138	30
Punto 3	2475	35
Punto 4	2813	40
Punto 5	3150	50
Punto 6	3488	45
Punto 7	3825	50
Punto 8	4163	60

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR H_∞

3.1. PROBLEMA DE SENSIBILIDAD MIXTA $S/KS/T$

Como se indica en la Introducción, el principal objetivo del proceso es la regulación de la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador, así como controlar el sobrecalentamiento del refrigerante a la salida del evaporador. Para ello, se utilizan la velocidad de giro del compresor y la apertura de la válvula de expansión como variables de control. Por lo tanto, se trata de un problema de control multivariable, con dos entradas y dos salidas.

Se propone un controlador robusto centralizado multivariable, teniendo en cuenta que el sistema debe trabajar adecuadamente en distintos puntos de operación. Es difícil descubrir la forma en que las variaciones en cada parámetro del modelo afectan a las salidas, de forma que no es razonable diseñar un controlador basado en incertidumbres paramétricas. Por tanto, se diseña un controlador H_∞ basado en incertidumbre no estructurada, usando el enfoque del Problema de Sensibilidad Mixta.

El diseño del controlador H_∞ se puede formular como un problema de optimización, que puede ser representado bajo la configuración general mostrada en la Figura 4. En esta figura, $P(s)$ representa la planta generalizada, $K(s)$ el controlador, u las señales de control, v las variables medidas, ω las señales externas y z las variables de error.

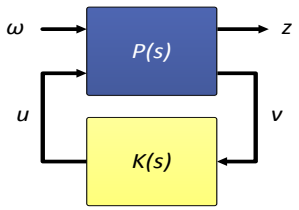


Figura 4: Formulación general del problema de control

El problema de control óptimo H_∞ con esta configuración consiste en calcular un controlador de tal forma que se minimice el ratio γ entre la energía del vector de error z y la energía de las señales externas ω.

La resolución de este problema óptimo está aún abierta, pero existen soluciones para el caso subóptimo [4], [7]. Por tanto, se minimiza lo máximo posible el ratio γ mediante un procedimiento iterativo.

La configuración usada para construir la planta generalizada $P(s)$ viene determinada por el Problema de Sensibilidad Mixta $S/KS/T$ [25], que se muestra en la Figura 5. En este caso la expresión para la función de transferencia en bucle cerrado resultante es la mostrada en la Ecuación (2), donde $S_0(s)$ es la matriz de transferencia de sensibilidad a la salida, $T_0(s)$ es la matriz de transferencia de sensibilidad complementaria a la salida y $K(s)S_0(s)$ es la matriz de transferencia de sensibilidad al control, cuyas expresiones se recogen en la Ecuación (3). $W_S(s), W_T(s), W_{KS}(s)$ constituyen

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

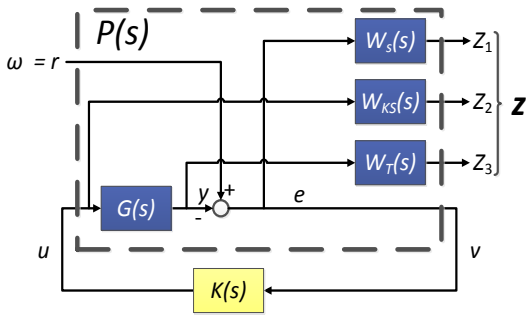


Figura 5: Problema de Sensibilidad Mixta $S/KS/T$

sus respectivas matrices de ponderación, que permiten especificar el rango de frecuencias relevantes para la matriz de transferencia en bucle cerrado.

$$T_{zw}(s) = \begin{bmatrix} W_S(s)S_0(s) \\ W_{KS}(s)K(s)S_0(s) \\ W_T(s)T_0(s) \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} S_0(s) &= (I + G(s)K(s))^{-1} \\ K(s)S_0(s) &= K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} \\ T_0(s) &= G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} \end{aligned} \tag{3}$$

Para problemas de seguimiento de referencias, atenuación de ruidos y estabilidad robusta con respecto a incertidumbres multiplicativas a la salida es necesario moldear adecuadamente $T_0(s)$. Por otra parte, un moldeo conveniente de $S_0(s)$ mejora el comportamiento dinámico del sistema. Además, la matriz $K(s)S_0(s)$ permite evitar problemas numéricos en el algoritmo de síntesis del controlador.

Por consiguiente, puesto que el controlador se obtiene a partir de la planta generalizada, el problema de síntesis se reduce al diseño de las matrices de ponderación que impondrán las especificaciones de control. Una vez diseñadas, se puede construir la planta generalizada como se muestra en la Figura 5 y se puede calcular el controlador mediante el algoritmo de síntesis.

3.2. DISEÑO DE LAS MATRICES DE PONDERACIÓN

La selección de las matrices de ponderación se ha realizado siguiendo las reglas de diseño propuestas en [13], [12]. Para ello, es necesario en primer lugar *ajustar el sistema en escala*, de acuerdo con la máxima desviación permitida para cada entrada y salida. En esta aplicación, se han considerado los valores indicados en la Ecuación (4).

$$\begin{aligned} \Delta N = 337\ rpm\ , \quad \Delta T_{out,sec,e} = 0{,}02\ ^oC, \\ \Delta A_v = 10\,\%\ , \quad \Delta TSH = 3{,}9676\ ^oC. \end{aligned} \tag{4}$$

Teniendo estos valores en cuenta, el sistema puede ser escalado de acuerdo a la Ecuación (5), donde $G(s)$ es la matriz de transferencia identificada en la sección anterior y $\hat{G}(s)$ es el sistema escalado. Las matrices de escalado D_u y D_e se calculan como se indica en la Ecuación (6).

$$\hat{G}(s) = D_e^{-1} G(s) D_u \tag{5}$$

$$\begin{aligned} D_e &= \begin{bmatrix} \Delta TSH_{max} & 0 \\ 0 & \Delta T_{out,sec,e\ max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 0{,}05 \end{bmatrix} \\ D_u &= \begin{bmatrix} \Delta N_{max} & 0 \\ 0 & \Delta A_{v\ max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 337 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6}$$

De cara al diseño del controlador robusto se selecciona como modelo nominal el correspondiente al punto P_4. Una vez se dispone del modelo nominal escalado, la incertidumbre multiplicativa a la salida se puede estimar como se muestra en la Ecuación (7), donde $\hat{G}(s)$ es el modelo nominal escalado y $\hat{G}_{P_i}(s)$ es el modelo no nominal identificado en el punto P_i $(i = 1, 2, ..., 8)$. El máximo valor singular de las incertidumbres estimadas se representa a lo largo de la frecuencia en la Figura 6.

$$\hat{E}_{o_{Pi}}(s) = (\hat{G}_{Pi}(s) - \hat{G}(s))\hat{G}(s)^{-1} \tag{7}$$

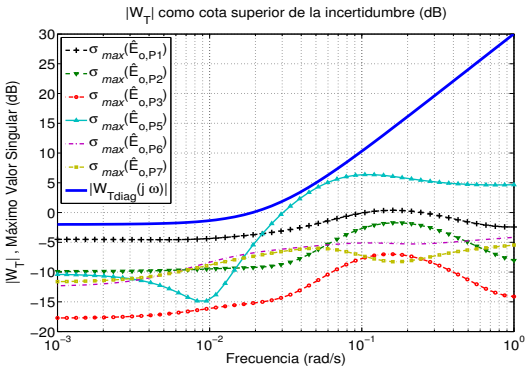


Figura 6: $W_T(s)$ como cota superior de los valores singulares máximos de la incertidumbre multiplicativa a la salida

A continuación, la matriz $W_T(s)$ se diseña como una matriz diagonal con todos sus elementos diagonales con la misma función de transferencia, como se indica en la Ecuación (8), donde $W_{T_{diag}}(s)$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

debe ser estable, de fase mínima, con alta ganancia a alta frecuencia y con magnitud mayor que el máximo valor singular de la incertidumbre, para cada modelo no nominal y frecuencia, como se muestra en la Ecuación (9). En la Ecuación (10) se indica la función de transferencia $W_{T_{diag}}(s)$ calculada en este caso, cuya magnitud se representa superpuesta en la Figura 6, observándose el cumplimiento de todos los requisitos impuestos.

$$W_T(s) = W_{T_{diag}}(s) I_{2x2} \tag{8}$$

$$|W_{T_{diag}}(j\omega)| \geqslant \sigma_{max}(\hat{E}_{oPi}(j\omega)) \quad \forall\omega,\ \forall Pi \tag{9}$$

$$W_{T_{diag}}(s) = \frac{31{,}773s\ +\ 0{,}79433}{0{,}00565s\ +\ 1} \tag{10}$$

La matriz W_S se toma como una matriz cuadrada diagonal de funciones de transferencia, como se indica en la Ecuación (11), donde cada elemento diagonal W_{S_i} se diseña de acuerdo a la Ecuación (12).

$$W_S(s) = \begin{bmatrix} W_{S_{TSH}}(s) & 0 \\ 0 & W_{S_{T_{out,sec,e}}}(s) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$W_{S_i}(s) = \frac{\alpha_i s\ +\ 10^{(\kappa_i - 1)}\omega_T}{s\ +\ \beta_i 10^{(\kappa_i - 1)}\omega_T}, \quad i = TSH, T_{out,sec,e} \tag{12}$$

ω_T es la frecuencia de corte de $W_{T_{diag}}(s)$ y su valor es $1{,}92 \cdot 10^{-2}$ rad/s. Los parámetros α_i y β_i son las ganancias a alta y baja frecuencia respectivamente. De acuerdo con [13], se elige $\alpha_{TSH} = \alpha_{T_{out,sec,e}} = 0{,}5$ y $\beta_{TSH} = \beta_{T_{out,sec,e}} = 10^{-4}$.

Finalmente, los parámetros adimensionales κ_{TSH} y $\kappa_{T_{out,sec,e}}$ determinan el ancho de banda de la función de transferencia correspondiente, y sus valores deben ser mayores conforme aumenta la velocidad de respuesta deseada de la salida correspondiente. En el diseño propuesto los valores son $\kappa_{TSH} = 0{,}95$ y $\kappa_{T_{out,sec,e}} = 1{,}05$.

El diseño de las matrices de ponderación finaliza haciendo la matriz $W_{KS}(s)$ igual a la matriz identidad para evitar problemas numéricos en el algoritmo de síntesis del controlador.

Una vez que se han diseñado las matrices de ponderación, se puede construir la planta generalizada mostrada en la Figura 5 y calcular numéricamente el controlador.

3.3. RESULTADOS DEL DISEÑO

La síntesis del controlador H_∞ da lugar a un valor de atenuación γ de 1.3392. De acuerdo con la Ecuación (13), el valor obtenido no garantiza estabilidad robusta, de forma que es necesario comprobar que las funciones de sensibilidad no exceden sus cotas con el controlador diseñado.

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty = \left\| \begin{pmatrix} W_S(s)S_0(s) \\ W_{KS}(s)K(s)S_0(s) \\ W_T(s)T_0(s) \end{pmatrix} \right\|_\infty < \gamma \tag{13}$$

En la Figura 7 se muestran las funciones de sensibilidad a la salida diagonales, junto con sus funciones de ponderación. Asimismo en la Figura 8 se muestran las funciones de sensibilidad complementaria a la salida diagonales junto con la función $W_{T_{diag}}(s)$. Se observa que las funciones de sensibilidad permanecen por debajo de sus cotas a lo largo de todo el espectro de frecuencias y por tanto el diseño es robusto.

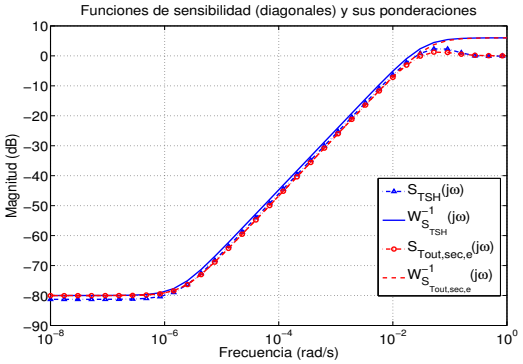


Figura 7: Funciones de sensibilidad diagonales y sus ponderaciones

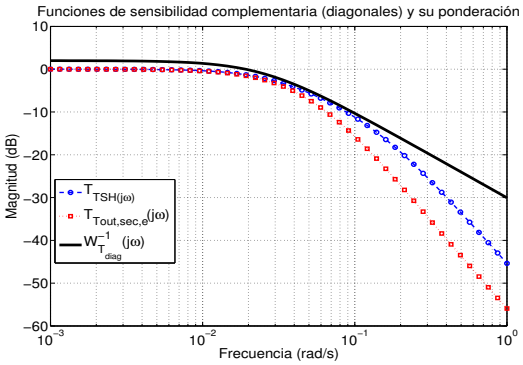


Figura 8: Funciones de sensibilidad complementaria y su función de ponderación

En la Tabla 2 se recogen las frecuencias de corte con $-3\ dB$ de las funciones de sensibilidad diago-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

nales mostradas en la Figura 7, las cuales dan una idea aproximada de la velocidad de respuesta en bucle cerrado para cada variable de salida, junto con los tiempos de subida (t_s) correspondientes.

Tabla 2: Frecuencias de corte (ω_B) de las funciones de sensibilidad diagonales.

Variable de salida	ω_B**(rad/s)**	t_s **(s)**
TSH	0,01535	102,3
$T_{out,sec,e}$	0,01763	89,1

La respuesta en bucle cerrado de la temperatura de salida del fluido secundario en el evaporador es más rápida que la del grado de sobrecalentamiento, de acuerdo con la relación de prioridades en el seguimiento de referencias comentada anteriormente.

En este punto es necesario recordar que el controlador se ha diseñado para el modelo escalado, de forma que el controlador real a aplicar al sistema necesita ser reescalado, de acuerdo a la Ecuación (14), donde las matrices D_u y D_e fueron mostradas en la Ecuación (6).

$$K(s) = D_u \hat{K}(s) D_e^{-1} \tag{14}$$

El controlador $K(s)$ obtenido mediante este procedimiento es en general de alto orden, el cual es conveniente reducir para su implementación práctica evitando fragilidad numérica. Para ello se estudian los *valores singulares de Hankel* de $K(s)$, despreciando los estados con menor energía. Asimismo, ya que el controlador no tiene efecto integral, sino en general polos muy cerca del origen, se convierten manualmente dichos polos en integradores para lograr el efecto de seguimiento exacto de referencias en régimen permanente.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En la Figura 9 se presentan resultados de simulación del controlador H_∞ ante cambios en las señales de referencia para las dos variables controladas. Se compara el desempeño del controlador H_∞ con el de un controlador PID descentralizado similar al mostrado en [10], en el que se controla TSH con A_v y $T_{out,sec,e}$ mediante N, diseñado en el punto de trabajo nominal considerado para el controlador H_∞. En el minuto 65 se aplica un escalón descendente en la referencia de TSH, manteniendo constante la referencia de $T_{out,sec,e}$; mientras que en el minuto 110 se aplica otro escalón en la referencia de $T_{out,sec,e}$, manteniendo la otra referencia. En la Figura 10 se muestran las acciones de control en ambos casos. El refrigerante utilizado es R404a. Las simulaciones han sido realizadas con el software de cálculo MATLAB®, empleando la herramienta *CoolProp* [3] para la evaluación de las propiedades termodinámicas del refrigerante.

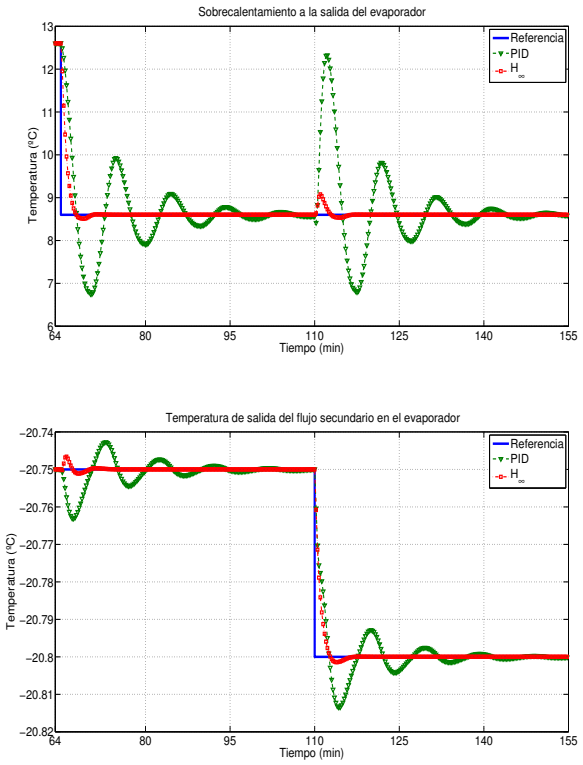


Figura 9: Evolución dinámica de las variables de salida en el punto de trabajo nominal

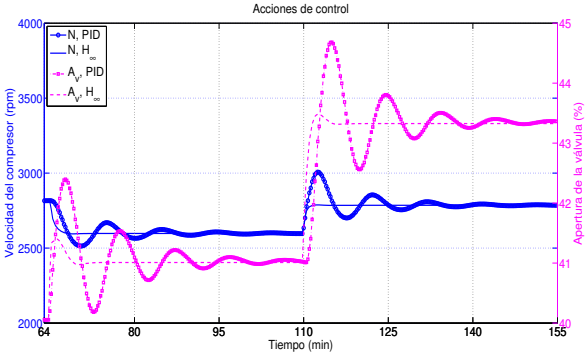


Figura 10: Evolución dinámica de las variables manipuladas en el punto de trabajo nominal

Se observa en la Figura 9 que el controlador H_∞, para aproximadamente el mismo tiempo de subida (aproximadamente 165 segundos para TSH y 130 segundos para $T_{out,sec,e}$), tiene mejor comportamiento dinámico y tiempo de establecimiento en el seguimiento de referencias, así como, al ser centralizado, provoca menor acoplamiento entre las

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

variables al modificar la referencia de una de ellas manteniendo la otra constante.

En las Figuras 11 y 12 se prueba la robustez del controlador en otro punto de trabajo distinto al nominal (en concreto, el punto 6 mostrado en la Figura 3), observándose el mismo comportamiento cualitativo de ambos controladores. De esta forma se comprueba la robustez del controlador H_∞ en un punto de trabajo no nominal.

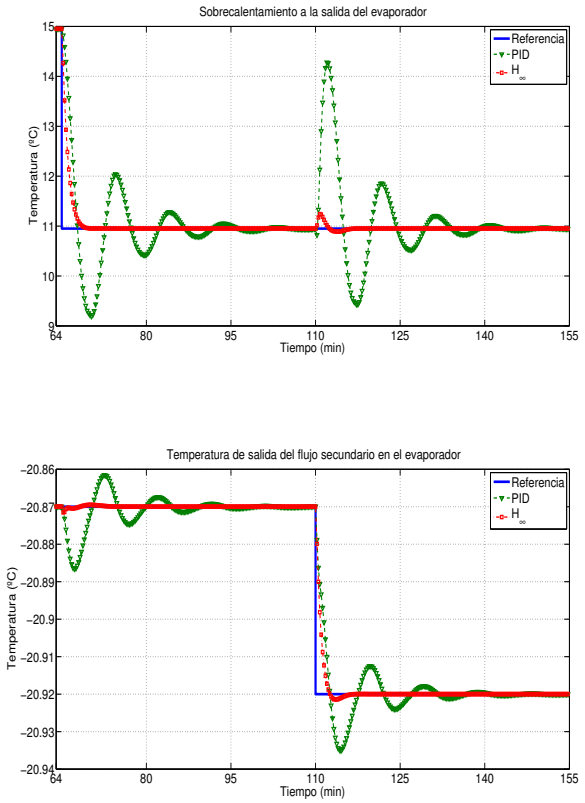


Figura 11: Evolución dinámica de las variables de salida en el punto de trabajo no nominal

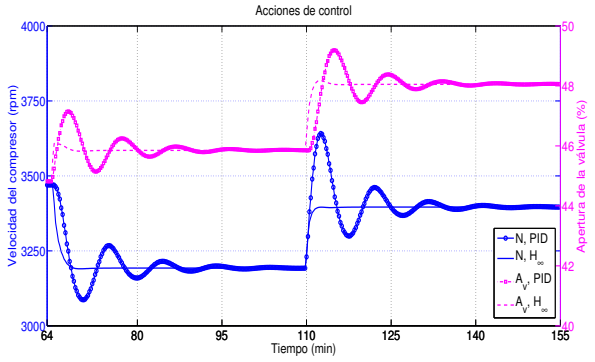


Figura 12: Evolución dinámica de las variables manipuladas en el punto de trabajo no nominal

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha diseñado un controlador centralizado H_∞ multivariable, basado en el Problema de Sensibilidad Mixta $S/KS/T$, para un ciclo de refrigeración de una etapa. Para ello, se ha identificado el sistema en diversos puntos de operación y se ha seleccionado uno de ellos como punto nominal, considerando el resto de sistemas identificados como incertidumbres no estructuradas y calculando las funciones de ponderación en base a ellas. Se ha comparado en simulación el desempeño del controlador robusto y el de un controlador PID descentralizado, observando el mejor desempeño del controlador H_∞ y la coherencia de los tiempos de respuesta con las especificaciones de diseño.

Como trabajos futuros, se pretende estudiar el comportamiento dinámico de ambos controladores en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, con el objetivo de validar experimentalmente los resultados de simulación obtenidos. Adicionalmente, se pretende realizar un análisis comparativo del rechazo de diferentes tipos de perturbaciones de los controladores H_∞ y PID descentralizado.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al MCeI por la financiación de este trabajo, a través del proyecto DPI2012-37580-C02-02.

Referencias

[1] Baxter, V. D., (2002) "Advances in supermarket refrigeration systems", *Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.*

[2] Bejarano, G., Ortega, M. G., Rubio, F. R., and Morilla, F., (2013) "Modelado simplificado y orientado al control de sistemas de refrigeración", *XXXIV Jornadas de Automática, Terrassa*, pp. 506-513.

[3] Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., and Lemort, V., (2014) "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, Iss. 6, pp. 2498-2508.

[4] Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P., and Francis, B., (1989) "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, Iss. 8, pp. 831-847.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[5] Fallahsohi, H., Changenet, C., Placé, S., Ligeret, C., and Lin-Shi, X., (2010) "Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, Iss. 2, pp. 409-418.

[6] He, X.-D., (1996) "Dynamic modeling and multivariable control of vapor compression cycles in air conditioning systems", *PhD Thesis*, Massachusetts Institute of Tecnology, Massachusetts, USA.

[7] Iglesias, P., and Glover, K., (1991) "State-space approach to discrete-time H_∞ control", *International Journal of Control*, Vol. 54, Iss. 5, pp. 1031-1073.

[8] Larsen, L. S., and Holm, J. R., (2003) "Modelling and multi-variable control of refrigeration systems", *In proc.: ECOS*. Copenhage, Dinamarca.

[9] Li, B., and Alleyne, A. G., (2010) "A dynamic model of a vapor compression cycle with shutdown and start-up operations", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, Iss. 3, pp. 538-552.

[10] Marcinichen, J., del Holanda, T., and Melo, C., (2008) "A dual siso controller for a vapor compression refrigeration system", *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, pp. 2444, 1-8.

[11] McKinley, T. L., and Alleyne, A. G., (2008) "An advanced nonlinear switched heat exchanger model for vapor compression cycles using the moving-boundary method", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, Iss. 7, pp. 1253-1264.

[12] Ortega, M. G., Castaño, F., Vargas, M., and Rubio, F., (2007) "Multivariable robust control of a rotatory dryer: Analysis and design", *Control Engineering Practice*, Vol. 15, Iss. 4, pp. 487-500.

[13] Ortega, M. G., and Rubio, F. R., (2004) "Systematic design of weighting matrices for H_∞ mixed sensitivity problem", *Journal of Process Control*, Vol. 14, Iss. 1, pp. 89-98.

[14] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., (2008) "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, Vol. 40, Iss. 3, pp. 394-398.

[15] Rasmussen, B. P., (2005) "Dynamic modeling and advanced control of air conditioning and refrigeration systems", *PhD Thesis*, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.

[16] Razi, M., Farrokhi, M., Saeidi, M. H., and Khorasani, A. R. F., (2006) "Neuro-predictive control for automotive air conditioning system", *IEEE International Conference on Engineering of Intelligent Systems,* pp. 1-6.

[17] Ricker, N. L., (2010) "Predictive hybrid control of the supermarket refrigeration benchmark process", *Control Engineering Practice*, Vol. 18, Iss. 6, pp. 608-617.

[18] Sarabia, D., Capraro, F., Larsen, L. F., and de Prada, C., (2009) "Hybrid NMPC of supermarket display cases", *Control Engineering Practice*, Vol. 17, Iss. 4, pp. 428-441.

[19] Schurt, L. C., Hermes, C. J. L., Trofino-Neto, A., "A model-driven miltivariable controller for vapor compression refrigeration systems", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, Iss. 7, pp. 1672-1682.

[20] Schurt, L. C., Hermes, C. J. L., Trofino-Neto, A., (2010) "Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, Iss. 13, pp. 1638-1546.

[21] Shen, Y., Cai, W.-J., and Li, S., (2010) "Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems", *Control Engineering Practice*, Vol. 18, Iss. 6 pp. 652-664.

[22] Skogestad, S. and Postlethwaite, I., (2005) "Multivariable Feedback Control", 2^{nd} ed., New York: Wiley.

[23] Underwood, C. P., (2001) "Analysing multivariable control of refrigeration plant using MATLAB/Simulink", *VII International IBPSA Conference*.

[24] Wang, J., Zhang, C., Jing, Y., and An, D., (2007) "Study of neural network PID control in variable-frequency air-conditioning system", *IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 317-322.

[25] Zhou, K., Doyle, J. C., and Glover, K. (1996) "Robust and optimal control", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SSS-SLAM: An Object Oriented Matlab Framework for Underwater SLAM using Side Scan Sonar

Daniel Moreno
daniel.morenolinares@gmail.com

Antoni Burguera, Gabriel Oliver
{antoni.burguera,goliver}@uib.es

Abstract

Side Scan Sonars (SSS) are frequently used by Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to observe the sea floor. However, automatically processing the information they provide to perform tasks such as Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) or mosaicking is difficult and error prone. Not only the literature is scarce on this subject, but also the number of software tools to help researchers is very reduced. This paper presents SSS-SLAM, a new Object Oriented software framework based on Matlab aimed at facilitating research on underwater SLAM using SSS. The framework includes both libraries and support tools.

Keywords: Side Scan Sonar, SLAM, Library, Software framework

1 INTRODUCTION

Acoustic sensors or *sonars* are the modality of choice in underwater robotics as they present wider angular coverage and longer sensing range than optical sensors such as laser range finders or cameras. Moreover, they are not influenced by the illumination conditions and are able to produce satisfactory maps even in turbid waters.

There is a wide range of acoustic sensors used nowadays in underwater robotics. For example, *multi-beam* sonars are especially used to produce elevation maps of the sea floor known as *bathymetry*. *Synthetic Aperture Sonars* (SAS) provide echo intensity profiles with very high resolution and sensing range. *Mechanically Scanned Imaging Sonars* (MSIS) provide echo intensity profiles with lower resolution and range than SAS, but they are mounted on a rotating head so that they provide 360^o views of the environment [10, 4].

Side-Scan Sonars (SSS), similarly to SAS, provide echo intensity profiles but with lower resolution and sensing range. They are not mounted on a rotating platform, as MSIS are, so they provide single slices of the sea floor. However, conventional SSS are still the sensor of choice in sea floor imagery, and should remain in the near future, basically for economic reasons, but also because of its ease of deployment: in some cases they have a towfish structure, so there is no need for complex mountings on *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV), *Remotely Operated Vehicles* (ROV) or ships.

Traditionally, SSS have been used to provide underwater imagery for human inspection. However, the images they produce have undesirable properties to be automatically analyzed, jeopardizing full autonomy in AUVs. For example, raw SSS images are a geometrically distorted representation of the environment [5], especially in non-flat terrains. Also, as SSS measurements correspond to single slices of the sea bottom, joining them to build an acoustic image requires accurate AUV pose information. Additionally, SSS, as well as any other kind of sonar, ensonify the observed region unevenly. Because of that, the echoes perceived by the sensor are not only influenced by the sea bed properties, but also by the sensor itself [3].

Unfortunately, the literature is scarce on studies dealing with these problems to allow fully autonomous use of SSS data. Most of the existing studies either are aimed at environments with clearly distinguishable objects [9] or are too computationally complex to allow on-line deployment in most cases [2]. In particular, the problem of *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) with SSS is far from being solved mainly due to the difficulty of properly registering SSS imagery [1].

Another problem when dealing with SSS data is the lack of software, especially if performing SLAM is the main goal. Most of the existing software is propietary, with no sources available, and basically aimed at displaying the SSS imagery for human inspection, using in some cases *Doppler Velocity Log* (DVL), *Inertial Measurement Unit* (IMU) or *Global Positioning System* (GPS) data to somehow take into account the linear vehicle speed when displaying SSS imagery. That's the case, for example, of the *Imagenex Win881SS* program. Other products, such as *SonarWiz*,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

by *Chesapeake Technology*, actually do complex acoustic image processing such as mosaic building and data fusion but, still, it is neither designed for the user to test its own SSS image processing algorithms neither to integrate it with different SLAM approaches.

Being SSS an interesting sensor to perform underwater mosaicking and SLAM, we developed SSS-SLAM, a software framework, composed of a library and different visualization tools, to facilitate research on this subject. The main characteristics of this framework are as follows. First, it is able to work with sonars from different manufacturers by using the *de facto* standard data format *Extended Triton Format* (XTF) [7]. Second, it is easily scalable so that other sensors, such as IMU or GPS, can be integrated with minimum effort. Third, it allows easy reuse of its components and facilitates the inclusion of new algorithms as it is *Object Oriented* (OO). Fourth, it is written in Matlab, a tool widely used by the research community that allows *Rapid Application Development* (RAD) of research prototypes and has a large pool of data processing and optimization libraries. Finally, the proposed framework allows georeferencing AUV trajectories and acoustic mosaics and interacts with *Geographical Information System* (GIS) visualizers.

This paper is devoted at describing this software framework, as well as showing the theory behind it, thus providing a basic tutorial on SSS and SSS-SLAM. It is structured as follows. Section 2 describes the SSS operation, including the acoustic image formation. Sections 3, 4, 5 and 6 focus on SSS-SLAM, explaining its dead reckoning, mosaicking, SLAM and georeferencing capabilities. Section 7 shows the results obtained by feeding SSS-SLAM with real underwater data. Finally, Section 8 show the conclusion and proposes some future work. The Matlab source code as well as the SSS and DVL data used in the experiments are available at `http://dmi2.uib.es/burguera/JA2014/`.

2 THE SIDE SCAN SONAR

Figure 1 illustrates the operation of a SSS mounted on a AUV navigating at an altitude h. An AUV usually has two SSS heads, symmetrically placed on port and starboard with a fixed angle θ. Each sensing head periodically generates an ultrasonic pulse which, after reaching the sea floor, is partially scattered back to the sensor. The SSS then analyzes the received echo to obtain information about the *ensonified region* (ER). The expansion of the sound wave with time is modelled by the sensor opening α.

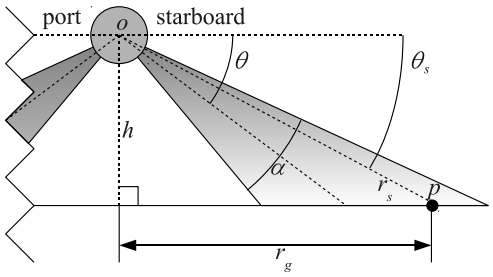


Figure 1: Side-scan sonar characterization.

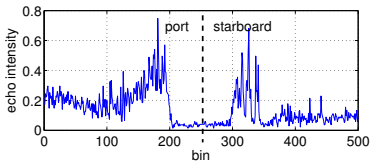


Figure 2: An example of a single swath.

The sensor operation is as follows. After each ultrasonic pulse emission, the sensor records the received echo intensities at fixed time intervals until a new pulse is emitted. Henceforth, this recorded data vector will be referred to as a *swath* and each of its items, which store an echo intensity providing information about the structure and reflectivity of the sea floor, will be referred to as a *bin*. The *Time Of Flight* (TOF) corresponding to each bin determines the *slant range* r_s of a point p in the ER. The sampling period determines the slant range resolution and the time between emitted pulses determines the maximum sensor range. The position of a point p in the ER is usually expressed in polar coordinates $(r_s,\ \theta_s)$. Sometimes a point p is also characterized by its *ground range* (r_g). The ground range makes it possible to project the SSS data to the sea floor by means of a process known as *slant correction*.

2.1 Swaths and acoustic images

A typical SSS has two synchronized sensing heads and, thus, the swaths are provided in pairs: one provided by the port sensing head and one provided by the starboard sensing head. Let us, for the sake of clarity, join each two simultanously gathered swaths in a single vector. Henceforth, the term *swath* will refer to this new vector.

Figure 2 shows an example of a swath corresponding to the port (bins 1 to 250) and starboard (bins 251 to 500) sensing heads. The central region with low echo intensities is the so called *blind zone* and it corresponds to those distances from the sensor where no sea floor was detected. Thus, echo intensity values in the blind zone are due to sensor noise and suspended particles in water. The first

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

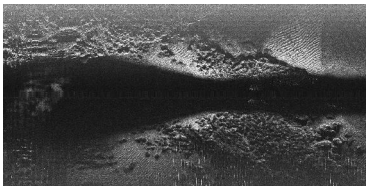


Figure 3: Simple acoustic image.

significant echo outside the blind zone is the *First Bottom Return* (FBR), corresponds to the first sea floor point that produced an echo and can be used to compute the AUV altitude if not available by other means.

As the AUV moves, several swaths are gathered. By aggregating swaths, an *acoustic image* is built. The most basic form of acoustic image building consists in putting the swaths together, one next to the other. Figure 3 shows an example of this kind of images, where each echo intensity is mapped to a grayscale level so that lower intensities are darker. The changes in the black strip width, which is the blind zone, reflect changes in the AUV altitude: the higher the altitude, the wider the blind zone.

Although this approach may be sufficient for human inspection, it provides a distorted representation of the actual sea floor as it does not take into account the specific AUV motion between swaths. Solving this problem involves AUV localization or SLAM techniques, as well as the use of interpolation and blending techniques to fill gaps and combine overlapping swaths. As stated previously, the goal of the proposed software framework is to facilitate research on this subject. Properly projected acoustic images involving large trajectories are usually known as *mosaics*.

3 DEAD RECKONING

Dead reckoning is the process of calculating the AUV pose at time t by using the pose estimated at time $t-1$ and the speeds from time $t-1$ to time t. It is an incremental method and, thus, it is prone to *drift*. Nevertheless, dead reckoning is often used as a base pose estimator by other localization techniques. This section is devoted at describing the dead reckoning modules of SSS-SLAM.

Dead reckoning modules assume that a DVL is available, as AUVs are usually endowed with this kind of sensors. A DVL is an acoustic sensor measuring the AUV speeds by means of the Doppler effect. Usually, DVL devices also measure the AUV altitude using TOF techniques and are endowed with additional sensors, such as magnetometers, to measure heading.

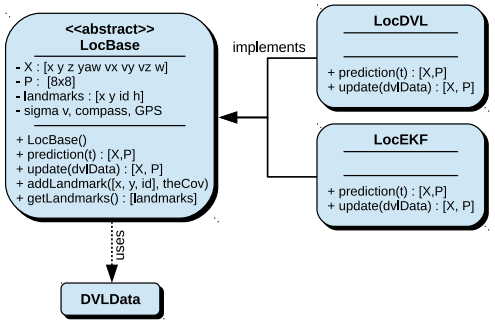


Figure 4: The BaseLoc, LocEKF and LocDVL classes.

Dead reckoning modules are able to access DVL data through the *DVLReader* class, which provides *DVLData* objects to encapsulate its output.

An abstract class *BaseLoc* provides the base methods and data structures that are implemented by *LocDVL* and *LocEKF*. The former is in charge of estimating the AUV pose using the pre-processed data provided by the DVL manufacturer. The latter, which actually constitutes our dead reckoning module, estimates the AUV pose by fusing the linear velocities, heading and altitude provided by the DVL using an *Extended Kalman Filter* (EKF)[12]. These classes are depicted in Figure 4.

The description of *LocDVL* is out of the scope of this paper, as it depends on non documented processes performed by the proprietary DVL software. As for *LocEKF*, the two key methods are *prediction* and *update*, which are in charge of the prediction and update EKF steps respectively. At the moment, planar motion with changes in altitude is implemented. Under this assumption, the prediction is performed using a constant velocity model as follows:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ \theta_t \\ v_{x,t} \\ v_{y,t} \\ v_{z,t} \\ w_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} + (v_{x,t-1}c\theta - v_{y,t-1}s\theta)\Delta t \\ y_{t-1} + (v_{x,t-1}s\theta + v_{y,t-1}c\theta)\Delta t \\ z_{t-1} + v_{z,t-1}\Delta t \\ \theta_{t-1} \\ v_{x,t-1} \\ v_{y,t-1} \\ v_{z,t-1} \\ w_{t-1} \end{bmatrix}$$

where $c\theta$ and $s\theta$ denote $\cos\theta_{t-1}$ and $\sin\theta_{t-1}$ respectively, x, y, z denote the 3D AUV position, θ denotes the yaw angle, v_x, v_y, v_z denote the linear velocities and w denotes the angular velocity. The subindexes t and $t-1$ are used to represent the current and the previous time step respectively.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

The EKF update, performed by the *update* member function in *LocEKF*, is in charge of incorporating sensor measurements to refine the pose estimates. The basic operation uses the velocities, orientation and altitude provided by the DVL. A DVL measurement $z_{DVL,t}$ at time step t is assumed to be as follows:

$$z_{DVL,t} = [z_{vx,t}, z_{vy,t}, z_{vz,t}, z_{\theta,t}, z_{z,t}]^T$$

where the five components of the vector denote the linear velocities, the orientation and the altitude provided by the sensor. In case a particular DVL device does not provide all this data, the library can be easily modified. As all these parameters have a direct correspondence with some of the state vector components, the implemented EKF observation function h_{DVL} is

$$h_{DVL} = [v_{x,t}, v_{y,t}, v_{z,t}, \theta_t, z_t]^T \quad (1)$$

It is straightforward to modify the class or to define other classes inheriting from *BaseLoc* focusing on the use of sensors other than DVL. As a matter of fact, *LocEKF* also supports the integration of GPS data when available through the h_{GPS} function. Some examples will be shown using GPS data when the AUV is in surface.

Using the aforedescribed prediction and measurement functions, as well as their associated Jacobian matrices, *LocEKF* applies the EKF formulation to provide an estimate of the next AUV state and its associated error in form of covariance matrix.

4 BUILDING MOSAICS

In the context of this paper, the term mosaic refers only to images built by positionning SSS swaths according to the estimated AUV poses. Registering partial SSS mosaics to improve the global one is not the goal of this software framework. Instead, it provides the basic tools to help researchers work in this subject.

SSS-SLAM encapsulates the SSS access in the *SSSReader* class, which outputs objects of the *SSSPing* class containing information about individual swaths. The SSS data is accessed by means of the widely used XTF format. However, being an OO framework, other classes inheriting from *SSSReader* could be easily included to cope with future revisions of the XTF format and to deal with different data formats.

As for building mosaics, both *SSSPing* objects and the AUV pose are required. The AUV pose may come from *LocEKF* or from *LocSLAM*, which is going to be discussed later. However, it has to be taken into account that the localization modules and the *SSSReader* may provide data at different time intervals. For example, using our particular sensors, *SSSReader* provides between 6 and 14 swaths for each *LocEKF* pose estimate. The *Beam* class has been developed to cope with these problems. Roughly speaking, *Beam* objects are buffers storing swaths gathered between consecutive pose estimates. Also, *Beam* objects store information about the AUV pose corresponding to its first stored swath so that they can be properly projected to build the mosaic. Additionally, even if no sensor data is available to perform the *LocEKF* update, the prediction could be executed to accurately place the individual swaths stored in Beam objects.

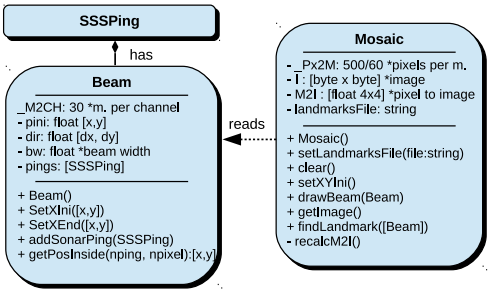


Figure 5: The Beam, Mosaic and SSSPing classes.

The class *Mosaic* is responsible for building the mosaics. On the one hand, it scales the *Beam* objects according to the SSS range and the desired mosaic resolution by converting from meters to a pixel space. On the other hand, it manages the full mosaic image by requesting memory as the mosaic grows. Finally, it offers functionalities to display the mosaic both on-line or off-line. The aforementioned classes are depicted in Figure 5.

5 SLAM

The goal of SLAM is to simultaneously estimate the AUV pose and the map of the environment. This is achieved by associating current and previously stored observations. SSS-SLAM focuses on landmark-based EKF-SLAM. Similarly to other modules, the framework structure facilitates the inclusion of other SLAM techniques, such as [6], which has proved to be more effective with imaging sonars that landmark based approaches.

The landmarks used are points and are related to individual swaths. This means that a swath, stored in *SSSPing* objects, can have zero or more associated landmarks and that the landmark coordinates are assumed to be local to each swath.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

At the moment, no automated landmark extraction is provided. However, the swath based representation provides a realistic way to work with landmarks, and facilitates the future integration of different landmark extraction methods. Also, it is possible to manually introduce landmarks and assign them identifiers through a simple Matlab interface to test different SLAM approaches.

EKF-SLAM is implemented in the *LocSLAM* class, which extends *LocEKF*, which implements the abstract *LocBase* class. The EKF-SLAM state vector X_t at time step t is

$$X_t = \begin{bmatrix} X_{AUV,t} \\ M_t \end{bmatrix}$$

where $X_{AUV,t}$ is the AUV pose and M_t, which is known as the map, is the set of the landmark coordinates observed until time step t.

Among others, *LocSLAM* provides methods to perform the EKF-SLAM prediction, data association, state augmentation and update steps. As for the prediction, its main functionality is inherited from *LocEKF*. Data association is in charge of determining if a landmark is observed for the first time or not. *LocSLAM* implements different data association methods, such as nearest neighbour and known associations, and can be easily extended. The first time a landmark is observed, it is used to perform the state augmentation.

In the state augmentation, a newly detected landmark L, which is expressed in meters with respect to the current robot pose, is appended to the state vector with respect to a global coordinate frame as follows:

$$X_t^+ = \begin{bmatrix} X_{AUV,t} \\ M_t \\ X_{AUV,t} \oplus L \end{bmatrix}$$

where $\oplus$ denotes the compounding operation [11].

In the EKF update step, stored landmarks have to be transformed to a local coordinate system, so that they can be compared with new landmarks, by means of the h function as follows:

$$h(G) = \ominus X_{AUV,t} \oplus G$$

where G denotes an existing landmark in the state vector stored in global coordinates and $\ominus$ denotes the transformation inversion operation [11]. Different coordinate transformation functions that take into account the uncertainties are provided both in the *LocEKF* class and in the static class *Utils*.

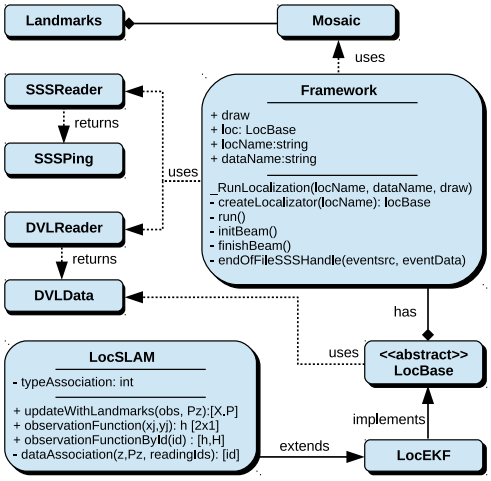


Figure 6: The *LocSLAM* class and its relationship with the framework.

The h function is used by the EKF together with the h_{DVL} defined in Equation 1 and h_{GPS} when available. Thus, thanks to these functionalities, *LocSLAM* provides SLAM capabilities on top of *LocEKF*. Figure 6 depicts the *LocSLAM* class and its relationship with other classes in the framework.

6 GEOREFERENCING

As a result of the aforementioned framework, the AUV trajectory and an acoustic mosaic of the sea bottom, both corrected by means of SLAM, are available. The next step is to georeference all this information. By doing so, the obtained data can be easily mixed with other sources, such as maps or bathymetry.

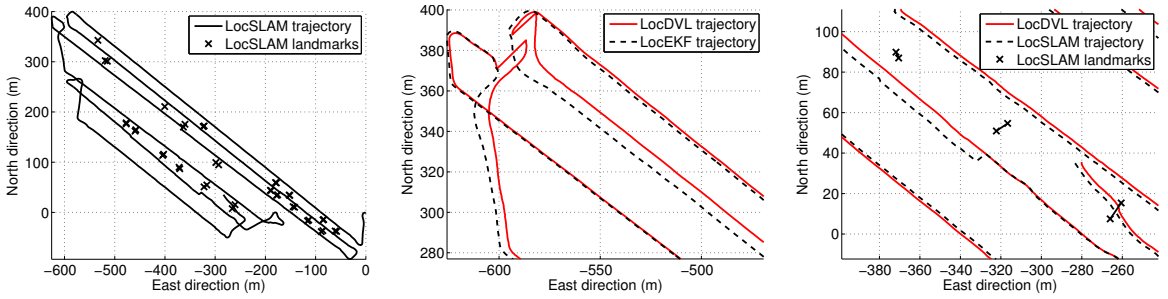
The georeferencing functions are provided by the *Utils* static class and the *Mosaic* class. For example, *Utils.trajectory2Shape* and *Utils.observations2Shape* allow the conversion of the AUV trajectory and the observations, respectively, to the *de facto* georeferencing standard format defined by the *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Also, the *Mosaic* class has the method *getRasterReference* providing a geoferenced TIFF mosaic.

Figure 7 show the georeferenced data provided by our framework displayed on the *Quantum GIS* [8] software.

7 RESULTS

This section shows some results produced by the described framework, demonstrating its capabilities. These results have been obtained using an Imagenex SportScan SSS with two sen-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) (b) (c)

Figure 8: (a) The full trajectory according to LocSLAM. (b) Comparison of LocDVL and LocEKF. (c) Comparison of LocDVL and LocSLAM.

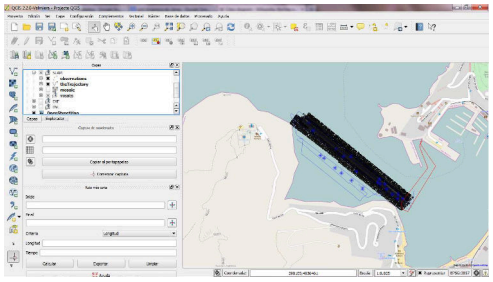


Figure 7: Georeferenced trajectories, observation and mosaic.

sor heads attached to an EcoMapper AUV at $\theta = 20^o$. The SSS operated at a frequency of 800KHz, being the wavelength 1.95mm and the opening $\alpha = 30^o$. The AUV mission consisted of a sweeping trajectory along more than 4Km in Port de Sóller (Mallorca, Spain). During the straight transects, the AUV was underwater gathering SSS and DVL data. During the turns, the robot emerged to obtain the GPS position. The datasets corresponding to this mission are available at `http://dmi2.uib.es/burguera/JA2014/` together with the SSS-SLAM source code.

7.1 Localization modules

Figure 8-a shows the obtained trajectory according to LocSLAM. At this scale, differences between the different localization modules are barely appreciable. Accordingly, next Figures will focus on specific areas of this trajectory.

Figure 8-b compares LocDVL, which is the DVL device proprietary localization strategy, and LocEKF, which constitutes the main SSS-SLAM dead reckoning module. Abrupt changes in the LocDVL pose estimates can be observed. These changes appear when the AUV surfaces and gathers GPS data. This suggests that the proprietary DVL localization algorithms basically switch to GPS when it is available. Contrarily, LocEKF smoothly corrects the AUV pose as it fuses both DVL dead reckoning and GPS using an EKF.

	LocDVL	LocEKF	LocSLAM
(μ, σ^2)	4.37, 3.16	3.45, 2.27	3.27, 2.25

Table 1: Mean μ (expressed in meters) and variance σ^2 of the errors

Figure 8-c compares LocDVL and LocSLAM. In this case, a significant pose correction can be appreciated in the LocSLAM trajectory due to a loop closing: a landmark is re-observed and LocSLAM corrects the trajectory to accomodate both observations. The landmarks leading to the loop closures are depicted as crosses, and the data associations are depicted as lines between the crosses.

SSS-SLAM also provides some basic tools to quantitatively evaluate trajectories, even in absence of ground truth. The evaluation is performed by comparing the estimated position of each landmark when it is reobserved with its estimated position the first time it was seen. The error of a certain trajectory is defined as the mean distance between observations of the same landmark. Since the same landmarks used for the SLAM module are available to the LocDVL and LocEKF modules, it is also possible to evaluate these two methods even if they do not not incorporate the landmark information to correct the trajectory.

Table 1 compares the errors between the three localization modules in this particular experimental setup. It can be observed how LocEKF improves the LocDVL results and that LocSLAM provides the best results.

7.2 Mosaicking modules

Figure 9 shows an example of a mosaic produced by the Mosaic class. It corresponds to the same areas shown in the localization experiments. The mosaic is mostly composed of the swaths gathered in the straight transects as, during the turns, the AUV emerged to gather GPS data and no SSS was

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

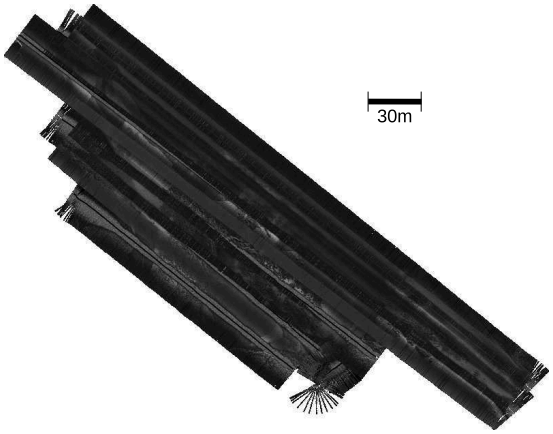


Figure 9: A mosaic built by the class Mosaic.

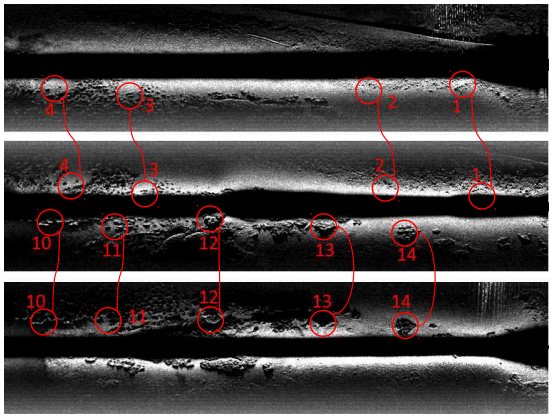


Figure 10: Three overlapping fragments of the mosaic showing the landmarks used to perform SLAM.

available. It is important to emphasize that, even if an AUV does not emerge during the mission, the SSS data gathered while it is rotating is not used usually as it leads to large gaps between swaths in the mosaic requiring severe interpolation. This can be observed at the bottom of Figure 9 and at the end of each transect where the vehicle starts its rotation while still gathering SSS.

Figure 10 shows three fragments of the data gathered to build the mosaic. These three fragments correspond to the bottom-right region of Figure 9 and partially overlap. The landmarks used in this region for the LocSLAM to operate are also shown.

Figures 11-a, 11-b and 11-c show a close view of three of the landmarks in Figure 10 as they are seen in the two transects they appear. In particular, landmarks labeled as 12, 13 and 14 are depicted. It can be observed that, as the acoustic images strongly depend on the ensonification angle, the pairs of landmarks are significantly different. Thus, automatically detecting and matching

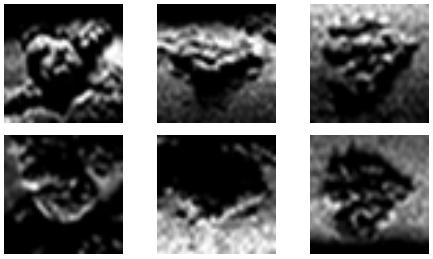


Figure 11: Details of (a) landmark 12, (b) landmark 13 and (c) landmark 14

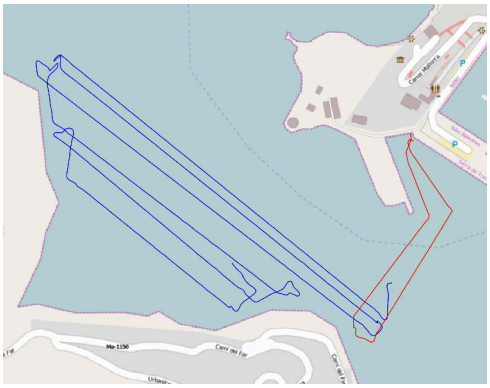


Figure 12: Georeferenced AUV trajectories corresponding to two different missions.

landmarks in SSS imagery is a complex task that has to take into account the specific behavior of SSS. The literature is scarce on this subject. This is one of the reasons that motivated this study: to build a software framework facilitating, precisely, the research on this area.

7.3 Georeferencing

As stated previously, the proposed software framework is able to label trajectories and mosaics with georeferencing information and storing this data in standard formats. Among others, georeferencing has two main advantages. First, it facilitates plotting trajectories and mosaics gathered at different times, and even with different AUVs, on a common map to see if they have parts in common. On the other hand, it makes it easy to observe if certain data collected by the SSS corresponds to previously mapped objects.

As an example, Figure 12 shows two trajectories corresponding to different missions. These two trajectories have been georeferenced by our software and then plotted using QGIS.

Figure 13 clearly illustrates the software capabilities of generating georeferenced mosaics. In this case, plotting the mosaic together with a map of the environment allowed us to ensure that the

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

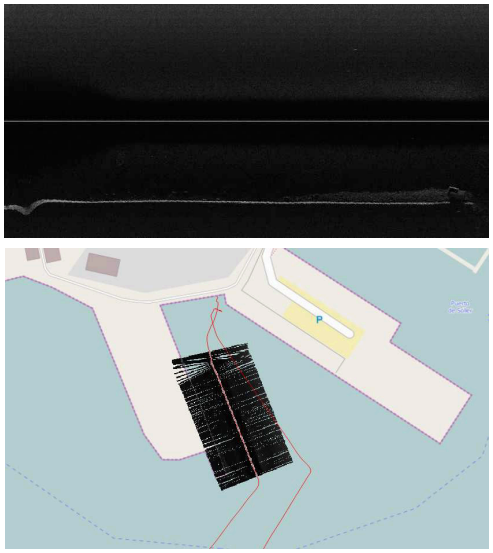


Figure 13: Georeferenced mosaic.
.

white stripe in the shown acoustic image actually corresponds to the port breakwater.

8 CONCLUSION AND FUTURE WORK

This paper presented SSS-SLAM, an OO software framework including both a library of objects and some visualization and export tools aimed at facilitating research on underwater SLAM and mosaicking using SSS. The advantages and capabilities have been discussed, showing the results obtained using data gathered by an AUV endowed with DVL, GPS and SSS in a real underwater scenario.

Our plans for future research on this subject now concentrate on two main aspects. First, to use SSS-SLAM to do research on underwater SLAM and develop algorithms for automatic SSS landmark extraction and matching. Second, to increase the system SLAM capabilities by implementing *Particle Filter* (PF) and Graph based SLAM techniques.

Acknowledgement

The underwater equipment used in this study has been provided by Unidad de Tecnología Marina-CSIC (http://www.utm.csic.es/auv/). The authors wish to thank Pablo Rodríguez Fornes, from UTM-CSIC for the datasets. This work is partially supported by the Spanish Ministry of Research and Innovation DPI2011-27977-C03-03 (TRITON Project), Govern Balear (Ref. 71/211) and FEDER Funds.

References

[1] J. Aulinas, X. Llado, J. Salvi, and Y.R. Petillot. Feature based slam using side-scan salient objects. In *OCEANS 2010*, pages 1–8, Sept 2010.

[2] K. Bikonis, M. Moszynski, and Z. Lubniewski. Application of shape from shading technique for side scan sonar images. *Polish Maritime Research*, 20(3):3–50, 2013.

[3] A. Burguera and G.Oliver. Intensity correction of side-scan sonar images. In *Submitted to IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, September 2014.

[4] A. Burguera, Y. González, and G. Oliver. The UspIC: Performing scan matching localization using an imaging sonar. *Sensors*, 12:7855–7885, June 2012.

[5] D.T. Cobra, A.V. Oppenheim, and J.S. Jaffe. Geometric distortions in side-scan sonar images: a procedure for their estimation and correction. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 17(3):252–268, Jul 1992.

[6] N. Hurtós, S. Nagappa, X. Cufí, and Y. Petillot. Evaluation of registration methods on two-dimensional forward-looking sonar imagery. In *Oceans*, 20013.

[7] Triton Imaging Inc. eXtended Triton Format (XTF) Rev. 35.

[8] Team QD. QGIS geographic information system. Open Source Geospatial Foundation, 2009.

[9] S. Reed, Y. Petillot, and J. Bell. An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28(1):90–105, January 2003.

[10] D. Ribas, P. Ridao, and J. Neira. *Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar*, volume 65 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, 2010.

[11] R. Smith, P. Cheeseman, and M. Self. A stochastic map for uncertain spatial relationships. In *Proceedings of International Symposium on Robotic Research, MIT Press*, pages 467–474, 1987.

[12] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics*. The MIT Press, 2005.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS MULTI-AGENTE EN SISTEMAS EMBEBIDOS CON RECURSOS LIMITADOS PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE COORDINACIÓN Y COOPERACIÓN

Ángel Soriano, Leonardo Marín, Ángel Valera, Marina Vallés
Instituto de Automática e Informática Industrial
Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España)
e-mail: {ansovi, leomarpa giuprog, mvalles}@ai2.upv.es,

Resumen

En este artículo se describe con detalle los pasos para la integración de los sistemas con recursos limitados en sistemas multi-agente. Para ello se describen las plataformas y los procedimientos, desarrollándose tres aplicaciones que exponen los beneficios que ofrecen estos sistemas. Las aplicaciones desarrolladas demuestran la capacidad de los sistemas multi-agente para resolver problemas que requieren un alto grado de coordinación y cooperación, así como las características que éstos tienen para la resolución óptima de las misiones. Los resultados experimentales manifiestan también la flexibilidad, escalabilidad, robustez y eficiencia en entornos con características muy diferentes, y que son fácilmente aplicables a entornos reales, como la industria, la colaboración entre robots móviles o comportamiento animal. Los agentes robóticos presentadas en este trabajo pueden socializar entre ellos y tienen la inteligencia y la capacidad de realizar el trabajo tanto de forma individual como de forma colectiva.

Palabras Clave: Sistemas multi-agente, sistemas embebidos, robots cooperantes, arquitecturas distribuidas, sistemas con recursos limitados.

1 INTRODUCCIÓN

La exposición y el desarrollo de la integración de sistemas multi-agente en diferentes áreas de investigación relacionadas con la robótica o sistemas heterogéneos autónomas es una metodología ampliamente utilizada en el área de investigación de robots móviles. El área de la inteligencia artificial (IA) se ha ido integrando en otras áreas de conocimiento, mostrándose muy útil, sobre todo en el campo de la robótica. Como bien se sabe, la IA se basa en el concepto de agente inteligente, definiendose como una entidad autónoma que observa a través de sensores e interactúa sobre el entorno usando actuadores [20]. Esta definición es muy cercana a los servicios que un robot puede proporcionar, por lo que el concepto de agente a menudo se relaciona con los robots [3], [24] y [14]. La capacidad de utilizar diferentes tipos de robots colaborativos y unificar la diversidad de arquitecturas y protocolos de comunicación que implementa cada uno, ofrece la ventaja de ser capaz de beneficiarse de cada una de las funcionalidades específicas de los robots. Por lo tanto, el sistema multi-agente se propone como una capa de control, abstrayéndose del sistema de comunicaciones, de los diferentes lenguajes de programación y de las diferentes plataformas de hardware. Ofreciendo además independencia y la capacidad de adaptación a cambios imprevistos en el sistema.

Por otro lado, podemos destacar que actualmente son muy populares diferentes tipos de robots pequeños que si bien ofrecen recursos más limitados que los robots profesionales, están orientadas a la robótica educativa, propocionando unos precios muy competitivos e interesantes.

De este modo, hay una gran variedad de plataformas multi-agentes diferentes, pero todos ellos tienen un nivel mínimo de cómputo y de conectividad. Esta última cuestión es súmamente importante puesto que se necesita la capacidad de comunicación entre los agentes para informar sobre algo, negociar, preguntar, etc.

En este trabajo se describe la integración de los sistemas multi-agente en sistemas embebidos que, debido a la capacidad de cálculo limitada y los protocolos de comunicación, no son capaces de ejecutar la plataforma multi-agente.

2 SISTEMAS MULTI-AGENTE

Un sistema multi-agente (MAS) es un conjunto de agentes autónomos capaces de trabajar juntos para resolver un problema [13]. Estos sistemas deben

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cumplir con ciertas condiciones [7]: MAS consiste de un entorno, un conjunto de objetos, un conjunto de agentes, un conjunto de relaciones que vinculan a los objetos y agentes, un conjunto de operaciones y la definición de los operadores que representan el empleo de las operaciones sobre el entorno, y su reacción cuando éstas se producen.

La unidad funcional de MAS es el agente. En la literatura se puede encontrar un gran número de diferentes definiciones de agente. Sin embargo, ninguna ha sido totalmente aceptada por la comunidad científica. Una de las más sencillas es la propuesta por [19], según la cual considera un agente como una entidad física o abstracta que percibe y actúa sobre un entorno. Así, un agente debe ser capaz de evaluar las percepciones y decisiones de los mecanismos de razonamiento, simples o complejos, así como actuar sobre el entorno en el que opera. De esta forma podemos comparar un MAS a un grupo de personas con diferentes dominios del conocimiento, tratando de resolver un problema común.

Hay tres conceptos importantes que son cruciales para la integración de un conjunto de agentes de diferentes tipos para formar un MAS: la comunicación, la cooperación y la coordinación.

Cuando un grupo de agentes individuales es parte de MAS aparece la necesidad de un mecanismo para coordinar el grupo de agentes y de un lenguaje que permita la comunicación entre ellos. Existen dos mecanismos principales de la coordinación: los casos en que los agentes tienen objetivos comunes y, por tanto, deben cooperar, y los casos en los que los agentes son competitivos y que tienen objetivos en conflicto con los demás. Es estos caso se requieren mecanismos de negociación [8], [23]. Entre los mecanismos de negociación más utilizadas en la literatura podemos destacar la formación de coaliciones, los mecanismos de mercado, la teoría de la negociación, la votación, las subastas y la asignación de tareas entre los agentes. En concreto, hay tres enfoques principales para la negociación automática: técnicas basadas en la teoría de juegos, técnicas basadas en heurísticas y técnicas basadas en el argumento [6], [17].

Por otro lado, la comunicación juega un papel muy importante puesto que las negociaciones dependen directamente de su eficacia. Hay diferentes lenguajes de comunicación agente como FIPA-ACL (*FIPA Agent Communication Language*) o KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) [1], [22].

En el desarrollo de nuevas metodologías para el diseño de sistemas multi-agentes, los investigadores han centrado sus esfuerzos en la ampliación de las metodologías ya existentes, principalmente en las áreas de metodologías orientadas a objetos y en los conocimientos de ingeniería [9]. Además, puesto que cada agente tiene al menos un hilo de control, un MAS es inherentemente multihilo [25]. Estas características hacen que MAS sea apropiado para las operaciones de desarrollo de sistemas o entornos complejos, dinámicos e impredecibles.

2.1 JADE – Java Agent Development Framework

El entorno de desarrollo elegido para la programación de sistemas multi-agente que se presentan en este trabajo es Java Agent Development Framework (o JADE).

JADE [10] es una plataforma de software libre para el desarrollo de agentes. Está en desarrollo desde el año 2001 y totalmente implementado en Java. JADE soporta la coordinación de múltiples agentes de acuerdo con las especificaciones FIPA y proporciona una implementación estándar del lenguaje de comunicación de agentes FIPA-ACL.

Originalmente fue desarrollado por Telecom Italia y se distribuye como software libre, siendo totalmente compatible con Java Development Kit (JDK) 1.4 o superior. Incluye la funcionalidad para la creación básica de agentes, la programación de los comportamientos de los agentes, la implementación de las especificaciones FIPA-ACL para el envío y la recepción de mensajes, diferentes clases útiles para la programación de protocolos FIPA, gestión de la información mediante ontologías, etc. Además, proporciona también la plataforma FIPA (AMS, Facilitador de directorio y MTS) de forma que puede ejecutarse en una o varias Java Virtual Machine (JVM) donde cada JVM es vista como un entorno donde los agentes pueden ejecutarse concurrentemente e intercambiar mensajes, organizándose en contenedores.

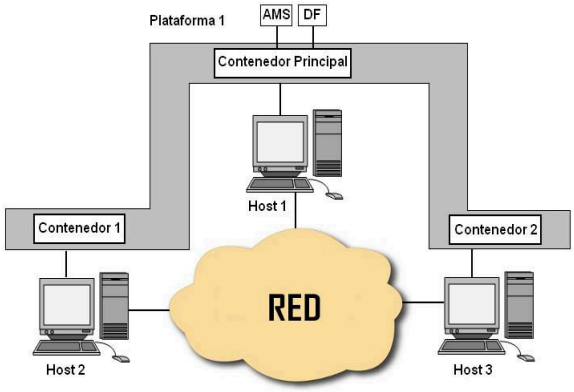


Figura 1. Estructura plataforma JADE

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El trabajo que tiene que realizar cada uno de los agentes se encuentra dentro de sus comportamientos (*behaviours*). Un comportamiento representa una tarea que un agente puede llevar a cabo, implementada como un objeto que extiende de la clase *jade.core.behaviours.Behaviour*. A fin de que un agente ejecute una tarea implementada en un comportamiento es suficiente con que el agente añada su comportamiento a la pila de comportamientos. Además, un comportamiento puede ser añadido en cualquier momento, cuando se crea el agente o desde dentro de otros comportamientos.

Un agente puede ejecutar varios comportamientos concurrentemente. Sin embargo, la planificación de comportamientos en un agente no es preventiva, sino cooperativa. Esto significa que cuando un comportamiento es planificado para ejecutarse, su método *action*() es ejecutado hasta que termina. Por lo tanto, es el programador quien decide cuándo un agente cambia de la ejecución de un comportamiento a la ejecución de otro.

El servicio de directorio (o servicio *yellow pages*) permite a los agentes publicar uno o más servicios que ellos proveen, para que otros agentes puedan buscar por un determinado servicio. El servicio de directorio en JADE (de acuerdo a la especificación FIPA) es previsto por un agente llamado DF (*Directory Facilitator*). Cada plataforma FIPA dispone de un agente DF por defecto, aunque se pueden activar más agentes DF con el fin de facilitar un catálogo de páginas amarillas distribuido por toda la red. Aunque es posible interactuar con el agente DF a través del intercambio de mensajes ACL como con cualquier otro agente, JADE simplifica estas interacciones mediante el uso de la clase jade.domain.DFService, con la que es posible publicar, modificar y buscar distintos servicios.

De esta forma, un agente que desea buscar un determinado servicio debe proporcionar al DF una plantilla de descripción. Como resultado de la búsqueda obtenemos una lista con todas las descripciones que concuerdan con lo buscado.

Partiendo de la descripción de los agentes que proporcionan un determinado servicio, se puede acceder a su nombre y enviar un mensaje para activar un determinado comportamiento.

Una de las características más importantes que los agentes JADE poseen es la habilidad para comunicarse. El paradigma de comunicación adoptado es el paso de mensajes asíncrono. Cada agente tiene una pequeña pila de entrada de mensajes donde el *runtime* de JADE almacena los mensajes enviados por otros agentes. Así mismo, cada vez que un mensaje es añadido a la cola de mensajes, el agente que lo recibe es notificado. Sin embargo, el instante en el que el agente recoge el mensaje de la cola y lo procesa depende únicamente del programador.

Un agente puede obtener un mensaje de su propia cola de mensajes utilizando el método *receive*(). Este método devuelve el primer mensaje en la cola de mensajes (y lo elimina) o devuelve *null* en caso de que la cola de mensajes esté completamente vacía. Del mismo modo, se dispone de una función bloqueante (*blockingReceive()*) para la recepción de mensajes, que detendrá el comportamiento hasta que un mensaje con las características necesarias sea recibido.
Además JADE incorpora el concepto de ontología para hacer más sencilla la semántica en las comunicaciones. Una ontología se basa en dos niveles de lenguaje de contenido: LEAP, no legible por humanos debido a que es byte-encoded, y SL, legible por humanos ya que codifica las expresiones como cadenas de caracteres.

3 APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

En esta sección se describe la integración de JADE en sistemas robóticos con recursos limitados. Éstos serán las plataformas utilizadas para la validación experimental de los problemas basados en misiones y de cooperación, el control cinemático del robot móvil, que incluye la integración de la fusión de datos mediante un filtro local para evitar los problemas típicos como las incertidumbres en la ubicación o posicionamiento, y finalmente, el esquema general de la arquitectura de control desarrollada.

3.1 INTEGRACIÓN DE JADE EN LOS SISTEMAS ROBOTIZADOS

Un agente JADE puede ejecutarse en cualquier sistema con JVM instalada y JDK 1.4 (o superior). Sin embargo, la integración de los agentes en los sistemas embebidos con recursos limitados no es trivial ya que no es habitual encontrar sistemas embebidos que tengan la capacidad de ejecutar JVM o JDK. Por lo tanto, la idea desarrollada para poder incorporar estos robots en MAS radica en el uso de la comunicación agente-robot para hacer transparente la relación entre el concepto de un robot físico y un agente de software, y así obtener un sistema de robot multi-agente (MARS).

MARS representa un sistema distribuido complejo, que consiste en un gran número de agentes robots cooperantes para resolver una tarea común. Cada

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

agente MARS es un sistema independiente que administra los subsistemas como ejecución de las tareas, la percepción del entorno por medio de sensores, control de trayectoria, las comunicaciones robots, etc. Cada agente de MARS representa un verdadero robot móvil físico que se comunica directamente con su agente de software que lo representa en MARS. Por ello, para una buena sincronización de esta relación, el tiempo de comunicación juega un papel importante. Sin embargo, algunos sistemas integrados ofrecen tasas de transferencia de ida y vuelta de cientos de milisegundos. Esto excluye, por ejemplo, la idea de que el control cinemático se calcule en un ordenador externo porque los retrasos de comunicación pueden hacer que el sistema inestable e impredecible. Por esta razón, en este trabajo se considera que cada robot calcula su propio control cinemático de forma local.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PLATAFORMAS HARDWARE

En este apartado se van a describir las plataformas más importantes utilizadas en este trabajo

3.2.1 Lego Mindstorms NXT

El robot Lego Mindstorms NXT es la 2ª versión del sistema desarrollado en colaboración entre Lego y el MIT [16], [18], presentado en enero de 2006 en el International Consumer Electronics Show. Esta versión, además de otros cambios menores en los sensores electrónicos y las piezas de construcción, incorpora una unidad de control nueva: el NXT.

La unidad de control, definida como ladrillo inteligente NXT, está basada en el ARM7, un potente microcontrolador de 32 bits, con 256 Kbytes FLASH y 64 Kbytes de memoria RAM. Para la programación y las comunicaciones, el NXT está equipado con un puerto USB 2.0 y con un dispositivo inalámbrico Bluetooth clase II, V2.0. Así mismo, el NXT dispone de 4 entradas (una de ellas incluye una expansión IEC 61158 Type 4/EN 50 170 para usos futuros) y 3 salidas analógicas. Una descripción más detallada de este sistema se puede encontrar en [11]. La Figura 2 muestra un ejemplo de robot que se puede montar con el Lego NXT.

Figura 2. Robot Lego configuración diferencial

Hay disponibles varios firmwares para programar al robot, pero en este trabajo se ha optado por LeJOS [12] porque es un entorno que permite funciones trigonométricas y matemáticas complejas, multi-hilo y soporta la programación orientada a objetos.

3.2.2 E-puck

Otro robot comúnmente utilizado por los investigadores para la validación experimental en el campo de la robótica móvil es el e-puck (ver Figura 3). El e-puck es un robot móvil de ruedas diferencial de móvil desarrollado por el Dr. Francesco Mondada y Michael Bonani en 2006 en la EPFL, (Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausanne) [5]. Es un robot de arquitectura hardware y software abierta que se compone de dos ruedas motorizados con capacidad de girar en direcciones opuestas para cambiar la dirección del robot. Además cuenta con varios sensores, de los cuales podemos destacar los sensores infrarrojos, muy útiles para medir la distancia a los objetos cercanos. Las señales de activación de los motores paso a paso están disponibles y pueden ser utilizados en lugar de los codificadores incrementales (físicamente no disponibles en los e-puck).

Figura 3: e-puck mobile robot.

La unidad de control del robot está basada en un microcontrolador dsPIC de Microchip que combina un procesador de 16 bits con una unidad de procesamiento digital de señales (DSP), proporcionando un procesamiento de datos muy eficiente. El microcontrolador dispone de 8kB de memoria RAM y 144kB de memoria flash. Funciona a una frecuencia de 64 MHz y proporciona hasta 16 MIPS.

Para la programación de las rutinas de control del robot se utiliza el sistema operativo de tiempo real y un entorno de desarrollo. El sistema operativo Erika Enterprise, que es un sistema operativo de código abierto OSEK/VDX [4]. El entorno de desarrollo es la herramienta de diseño de sistemas embebidos RT-Druid [21]. Éste, a su vez se sirve de MPLAB [15] para la compilación y descarga de las aplicaciones en el e-puck.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.2.3 Arquitectura de control utilizada

Para la coordinación de movimientos de varios robots se pueden utilizar diferentes arquitecturas de control. La figura siguiente muestra el esquema básico de control de la arquitectura utilizada en este trabajo.

Los robots se comunican con sus agentes software (computadores) vía Bluetooth. Los computadores son parte de del red que conforma el MAS global a través de JADE. Además, la arquitectura proporciona una cámara tipo webcam que se utiliza para la monitorización de los experimentos o, en algunos casos, proporcionar alguna información global del sistema.

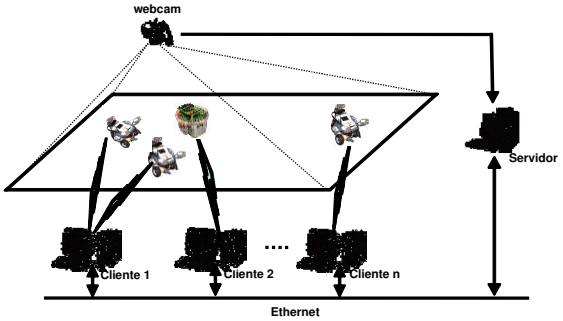


Figura 4. Arquitectura de control desarrollada

4 EXPERIMENTOS PRÁCTICOS

En esta sección se van a presentar dos aplicaciones desarrolladas con los robots que conforman la arquitectura distribuida MAS.

4.1 CONTROL JERÁRQUICO ADAPTATIVO

Este experimento tiene como objetivo recrear el comportamiento de las aves cuando se mueven en bandadas. Hay 6 robots e-pucks se mueven de forma aleatoria por todo el escenario. En un momento dado se establece una jerarquía que determina para cada robot a quién debe perseguir, cambiando así su destino para tratar de alcanzar al robot líder. Los robots se agrupan evitando las posibles colisiones que puedan ocurrir mientras se ajustan sus velocidades para mantener la formación del grupo.

Si a un robot no se asigna ningún líder, éste sigue avanzando sin un destino fijo. Este es el caso de los robots que se encuentran en la parte superior del esquema de jerarquía.

Para implementar esta aplicación, una cámara cenital captura la escena y las posiciones de los robots a través de señuelos colocados por encima de ellos en forma de triángulo de diferentes colores. Todos los e-pucks están conectados a través de Bluetooth a sus respectivos agentes software en la red de computadores que forman el MAS siguiendo el esquema descrito en la sección 3.2.3.

En esta aplicación, la cámara actúa como un agente más dentro del MAS. A través de la comunicación entre los agentes cada robot es capaz de conocer las posiciones de los demás, e incluso corregir su posición y orientación. A nivel local, cada e-puck tiene tres módulos principales en sus comportamientos. Uno de ellos es responsable de la comunicación con el agente de software que lo representa en el MAS, otro se encarga de la prevención de colisiones de forma reactiva si detecta un obstáculo cerca [2], y otro realiza el control para tratar de llegar a la posición de destino que se le ha asignado.

Cuando en algún momento se establece la jerarquía de la formación que los robots deben seguir, el agente inicia un comportamiento cíclico donde en cada tiempo de ciclo localiza todos los robots en el escenario y envía a cada agente de robot la posición de destino que debe ser alcanzada de acuerdo con el robot líder que se ha asignado. De este modo, los robots se agrupan de acuerdo a una jerarquía que puede ser cambiado en cualquier momento si lo desea, ajustan su velocidad y evitando colisiones entre ellos, creando la sensación de ser parte de una bandada de aves que se mueven en formación de vuelo. La figura 5 muestra un ejemplo de la ejecución de la aplicación. Un vídeo demostrativo del trabajo realizado se puede ver en: http://wks.gii.upv.es/cobami/webfm_send/10.

4.2 EMULACIÓN ENTORNO INDUSTRIAL

La segunda actividad realizada en este trabajo ha sido la recreación de un entorno industrial a través de sistemas embebidos con recursos limitados. Ésta se ha desarrollado con el fin de demostrar la utilidad del MAS en este tipo de entornos.

En el escenario, una cinta transporta una pieza hasta que ésta activa el sensor de presencia ubicado en el extremo de la cinta. En ese momento la cinta transportadora se detiene y un brazo robótico toma la pieza para depositarlo en un punto de almacenaje. Una carretilla elevadora (construido con piezas de Lego) se encarga de transportar las piezas desde el punto de almacenaje hasta el comiendo de la cinta, de tal manera que las piezas se encuentran de nuevo en la cinta transportadora y el ciclo se repite indefinidamente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

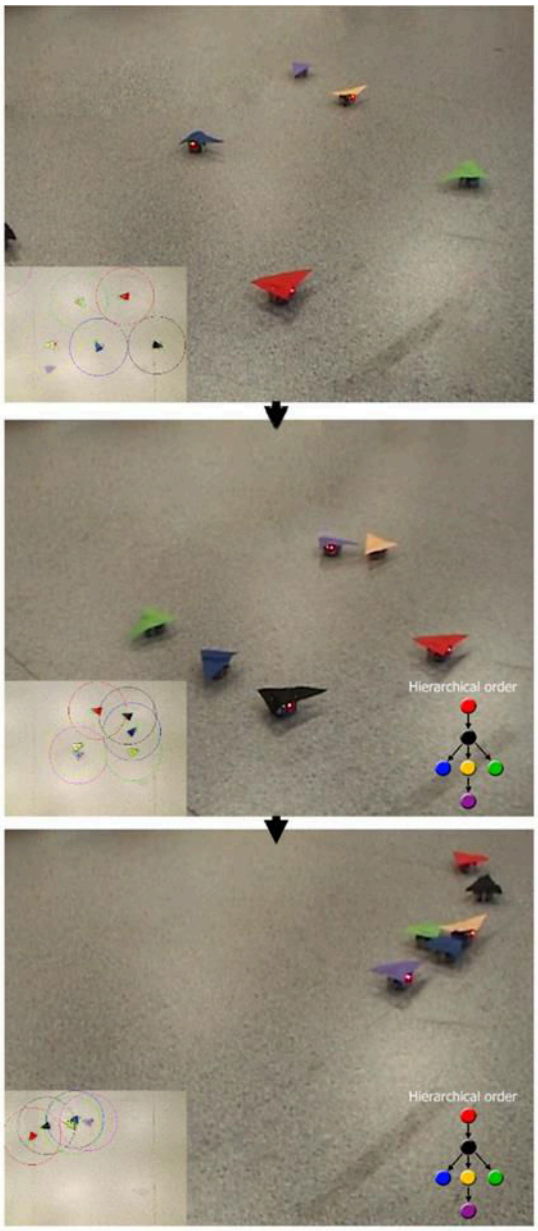


Figura 5: Ejemplo de la ejecución de la aplicación en tres fases: movimiento aleatorio, generación de la jerarquía y agrupamiento de robots

Hay tres piezas en movimiento en el escenario, pero el almacén sólo tiene la capacidad para albergar a una de ellas, por lo que cuando una pieza está en el almacén esperando a ser recogida, hasta que el carretilla montacargas no la recoge, el brazo robótico no pueden dejar a la siguiente.

Para demostrar las posibilidades del sistema se ha considerado un dispositivo más: un semáforo ubicado entre el almacén y la cinta transportadora. De esta a forma, si el semáforo está en rojo cuando la carretilla, ésta debe esperar a que el semáforo se ponga en verde.

La Figura 6 muestra una imagen del escenario real con los distintos elementos y su distribución del sistema de emulación del entorno industrial.

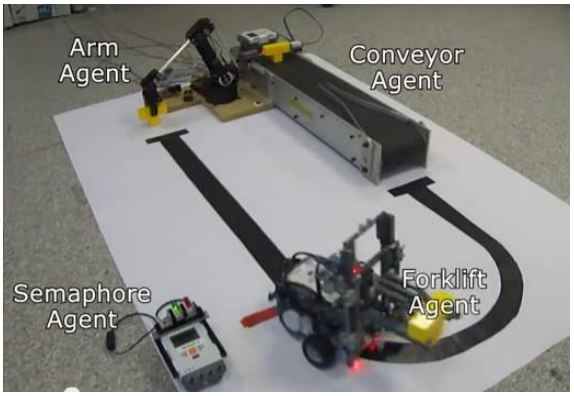


Figura 6: Aplicación del entorno industrial desarrollado

La aplicación está constituida por 4 agentes: el robot móvil carretilla elevadora, la cinta transportadora, el semáforo y el brazo robótico. La Figura 7 muestra el esquema específico para esta aplicación.

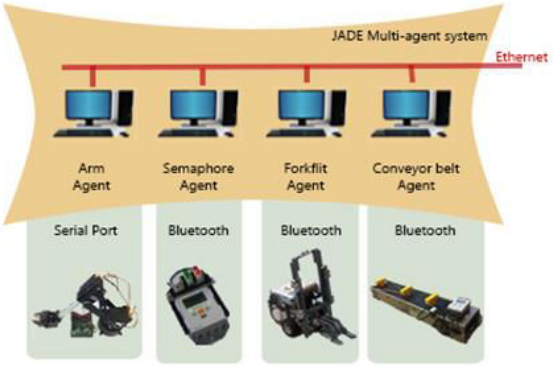


Figura 7: Arquitectura desarrollada para la emulación del entorno industrial.

La cinta transportadora y el sensor de presencia están controlados por un ladrillo Lego Mindstorms que está conectado a través de Bluetooth a un agente software que se ejecuta en un ordenador.

De la misma forma, hay dos agentes software más que se encargan del control del robot montacargas y del semáforo, comunicando cada uno de ellos con un ladrillo NXT.

El brazo robot se controla mediante un cuarto agente. En este caso es un agente que se ejecuta en el PC y que mediante el puerto serie envía las referencias de movimiento a dicho robot.

A diferencia de la programación secuencial utilizado normalmente en entornos industriales, la operación en esta aplicación es completamente distribuida. Cada agente ejecuta sus propios comportamientos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

que definen las acciones que se pueden realizar en cualquier momento. Mediante la comunicación entre agentes el sistema MAS puede resolver algunas acciones críticas que requieren de la colaboración y la cooperación entre los agentes.

Un hecho importante que se ha considerado es que el brazo robot sólo debe ir a recoger una pieza si ésta está esperando en el extremo final de la cinta transportadora. El agente brazo ejecuta para ello un comportamiento cíclico en que está a la espera de la llegada de un mensaje que informe que ya tiene una pieza disponible para transportarla. El encargado de enviar ese mensaje es el agente encargado del control de la cinta, de forma que se comunica con el agente del brazo cada vez que el sensor de la cinta transportadora detecta una pieza.

Otro punto crítico para el brazo robot es que debe asegurarse que el robot carretilla no está cerca del almacén, para evitar que choque contra él. También necesita saber si ya hay una pieza en el almacén a la espera de ser recogida por la carretilla. Esto se resuelve mediante la comunicación entre el agente del brazo y el agente de la carretilla elevadora. Para ello, el agente brazo debe pedir permiso al agente carretilla para realizar la acción.

El agente de la carretilla elevadora puede negarle el permiso porque todavía no ha podido ir a recoger la última pieza del almacén, o porque está dentro de la zona de peligro de colisión con el brazo.

En cualquier otro caso (cuando el almacén está libre o cuando el montacargas está fuera de peligro), el brazo puede realizar la acción de dejar la pieza en el almacén sin ningún peligro.

Otro punto esencial es el semáforo. Éste obliga al agente de la carretilla elevadora a pedir permiso para poder cruzar cada vez que la carretilla pasa por él. El estado del semáforo se puede cambiar en tiempo real pulsando los botones del ladrillo NXT. Esto hace que todo el sistema se puede bloquear en este punto: la cinta transportadora esperando el brazo para coger una pieza, el brazo esperando la confirmación de la carretilla para dejar una pieza en el almacén, y el montacargas bloqueado porque el semáforo no se permite que continúe. El sistema recupera la operación normal de forma automática cuando se vuelve a encender la luz verde del semáforo.

La aplicación desarrollada demuestra la flexibilidad, la eficacia y la robustez de los sistemas multi-agente en este tipo de entornos. En http://wks.gii.upv.es/cobami/webfm_send/8 se puede ver un vídeo con la ejecución de este sistema.

CONCLUSIONES

El área de investigación en robótica se está centrando cada vez más hacia el desarrollo de grupos de robots cooperativos. Esto implica que se deben proponer nuevas formas de resolver problemas ya que los enfoques clásicos no sirven para esto.

Por otra parte, si se desea poder investigar con la cooperación de un número grande de robots de gama alta, podemos encontrar problemas debido al coste excesivo que éstos supondrían. Como alternativa, hoy en día podemos encontrar una gran variedad de robots educativos que ofrecen características similares a los robots de gama alta pero con precios muy competitivos.

En este artículo se ha descrito la integración de los sistemas con recursos limitados dentro de los sistemas multi-agente. Se ha descrito las plataformas los y procedimientos de dos aplicaciones desarrolladas con esta filosofía, mostrándose los beneficios que ofrecen este tipo de sistemas.

De esta forma, las aplicaciones desarrolladas demuestran la capacidad del MAS para resolver problemas que requieren un alto grado de coordinación y cooperación entre los agentes, añadiendo además estrategias de negociación automática entre ellos y ofreciendo resultados óptimos de resolución de misiones. Además se han ofrecido soluciones a la problemática de la correspondencia entre agentes software y agentes físicos.

Estos resultados experimentos muestran también la flexibilidad, robustez y eficiencia en entornos con características muy diferentes, siendo fácilmente aplicable a entornos reales, como la industria, la colaboración entre robots móviles o comportamiento animal, etc.
Los agentes robots de las aplicaciones presentadas pueden socializar entre ellos, tienen la inteligencia y la capacidad de realizar el trabajo de forma tanto individual como colectiva.

No hay duda de que con el tiempo surgirán nuevas maneras de entender cómo deberían comportarse los agentes dentro de un grupo o una holarquía y nuevas estrategias de reconciliación de las teorías de los MAS de tipo software con su aplicación en agentes físicos. Por ello es perceptible como la teoría de los agentes inteligentes está cambiando la manera de concebir y diseñar los robots de hoy en día.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad España por la financiación parcial de este trabajo bajo los proyectos de investigación DPI2011-28507-C02-01 y DPI2013-44227-R. Así mismo se agradece también el apoyo financiero por parte de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

[1] Austin, J. L., (1962). *How to Do ThingsWith Words*. Oxford University Press: Oxford, England.

[2] Braitenberg V., (1991). Véhicules: expériences en psychologie synthétique, 171, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Switzerland.

[3] Bruce, K.B., Cardelli, L., Pierce, B.C., (1997). *Comparing Object Encodings. Theoretical Aspects of Computer Software*. Lecture Notes in Computer Science, volume 1281. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

[4] Erika Enterprise. Disponible en: http://erika.tuxfamily.org/drupal/

[5] e-puck educational robot. Disponible en: (http://www.e-puck.org/).

[6] Fatima, S., Wooldridge, M., Jennings, N.R., (2001). *Optimal negotiation strategies for agents with incomplete information*. In Intelligent Agent series VIII: Proceedings of the 8th International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-2001), volume 2333 of lecture Notes in Computer Science, pages 53-68. Springer Verlag, Berlin, Germany.

[7] Feber J., (1999). *Multi-Agent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence.* Addison Wesley, London.

[8] Huhns, M.N., Malhotra, A.K., (1999). *Negotiating for Goods and Services.*IEEE Internet Computing, vol. 3, no. 4, pp. 97-99.

[9] Iglesias C., Garijo M, Gonzales J.A., (1999). *Survey of Agent-Oriented Methodologies*.

[10] Java Agent Development Framework. http://jade.tilab.com

[11] Lego Mindstorms home page. Disponible en: http://mindstorms.lego.com/.

[12] LEJOS: Java for Lego Mindstorms. Disponible en: http://lejos.sourceforge.net

[13] Mas, A., (2005). *Agentes Software y Sistemas Multiagente: conceptos, arquitectura y aplicaciones.* Pearson-Prentice Hall.

[14] Michalewicz, Z., (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

[15] Microchip MPLAB ICD 2. Disponible en: http://www.microchip.com

[16] Papert, S., (2000). What's the big idea? Towards a pedagogy of idea power, IBM Syst. J., vol. 39, no, 3&4, pp. 720-729.

[17] Rahwan, I., Sonenberg, L. Dignum, F., (2004). *On interest-based negotiation*. Advances in Agent Communication Workshop held in conjunction with AAMAS-03, volumen 2922 de Lecture Notes in Artificial Intelligence, Berlin: Springer-Verlag, pp. 383-197.

[18] Resnick, M., Martin, F., Sargent, R. y Silverman, B., (1996). Programmable bricks: Toys to think with, *IBM Syst. J.,* vol. 35, no, 3&4, pp. 443-452.

[19] Russell, S., (1995). *Rationality and Intelligence. Artificial Intelligence*, 94, 57–77.

[20] Russell, S.J., Norvig, P., (2009). *Artificial Intelligence: A modern approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, Upper Saddle River, New Jersey.

[21] RT-Druid. Disponible en: http://www.evidence.eu.com/products/rt-druid.html

[22] Searle, J., (1969). *Speech acts: An essay in the philosophy of language.* Cambridge, England: Cambridge University.

[23] Singh, M.P. Huhns, M. N. (1999). *Multiagent Systems for Workflow.* International Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management, Volume 8, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 105-117.

[24] Van Leeuwen, J. (ed.), 1995. *Computer Science Today. Recent Trends and Developments*. Lecture Notes in Computer Science, volume 1000. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

[25] Wooldridge M., 2002. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons: Chicester, UK.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

OPTIMIZACIÓN DINÁMICA MEDIANTE DIFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA USANDO ECOSIMPRO Y CASADI

Rubén Martí*, Tania Rodríguez*, José Luis Pitarch*, Daniel Sarabia**, César de Prada*

*Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
C/ Real de Burgos S/N, 47011, Valladolid. {ruben, tania.rodriguez, jose.pitarch, prada}@autom.uva.es

**Dpto. Ingeniería Electromecánica (Área de Ingeniería de Sistemas y Automática),
Escuela Politécnica Superior, Campus Rio Vena, Universidad de Burgos.
C/ Francisco de Vitoria s/n, 09006, Burgos. dsarabia@ubu.es

Resumen

En el presente trabajo se aborda el problema de optimización dinámica de procesos industriales utilizando herramientas de diferenciación automática. Dicho problema de optimización se resuelve tanto con un enfoque secuencial (integración del modelo continuo del proceso) como simultáneo (discretización del modelo continuo), proporcionando además una comparativa entre ambos. La implementación y resolución del problema se ha realizado, complementariamente, con los paquetes de software EcosimPro y CasADi.

Palabras Clave: Optimización dinámica, enfoque simultáneo, enfoque secuencial, colocación ortogonal, optimización no lineal, NLP, SQP, diferenciación automática.

1 INTRODUCCIÓN

La optimización aparece como una necesidad en prácticamente todas las áreas de la ingeniería. Problemas típicos de diseño, modelado, identificación y control de procesos incluyen alguna etapa de optimización, bien sea estática, dinámica, fuera de línea o en tiempo real. Por otra parte, en otras disciplinas como el control del tráfico aéreo y aplicaciones aeroespaciales, la optimización dinámica juega cada vez más un papel muy importante [1].

Este artículo se focaliza en la optimización dinámica no lineal [2], i.e., el sistema y/o la función objetivo del problema es no lineal y parte del conjunto de restricciones son ecuaciones algebraico-diferenciales (DAEs). Este es el tipo de problema usual a resolver en aplicaciones de control predictivo basado en modelo (MPC), planificación y secuenciamiento de procesos por lotes, optimización de planta en tiempo real (RTO), reconciliación de datos, etc.

Para resolver problemas de optimización dinámica existen dos tipos de métodos: los denominados *indirectos*, basados en la teoría clásica de control óptimo en la cual la derivación de las condiciones de optimalidad se realiza vía cálculo variacional [3], y los métodos *directos*, que buscan una solución aproximada mediante métodos de cálculo numérico [4]. Mientras que aplicación de métodos indirectos finaliza en un problema de condición de contorno en múltiples puntos, complicado de resolver en muchos casos, el uso de métodos directos se traduce en la resolución de un problema de programación no lineal que, con la potencia de cómputo disponible en las CPUs actuales, resulta más asequible en cuanto a complejidad.

Actualmente hay dos maneras de abordar un problema de optimización no lineal mediante el método directo: el enfoque secuencial y enfoque simultáneo. La idea básica del enfoque *secuencial* es resolver el problema iterando entre una etapa de simulación, donde se integran numéricamente las restricciones dinámicas (ODEs y/o DAEs) del sistema, y una etapa de optimización, donde se resuelve un problema con restricciones algebraicas sobre los estados o cualquier otra variable o ecuación del modelo relativamente sencillo [5], [6]. Por el contrario, el enfoque *simultáneo* se basa en discretizar las ODEs y/o DAEs del sistema para, posteriormente, resolver directamente un problema de optimización estática formulado como ecuaciones solamente algebraicas [7].

Este artículo aborda la problemática existente con el uso de herramientas de programación no lineal basadas en gradientes para resolver problemas de optimización dinámica en la práctica. Además, se analizan las principales ventajas e inconvenientes de paquetes de software disponible (EcosimPro, CasADi), con el fin de proporcionar al usuario final una metodología a seguir para abordar y resolver de forma efectiva un problema de optimización dinámica, desde la fase inicial de modelado del sistema hasta la obtención de la solución óptima.

El artículo está organizado de la siguiente forma: en la siguiente sección se resumen los diferentes enfo-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ques existentes en literatura para resolver un problema de optimización dinámica, en la Sección 3 se realiza una descripción del paquete CasADi, a continuación en la Sección 4 se expone la propuesta para importar a CasADi modelos generados en EcosimPro, en la Sección 5 se describe el problema de optimización dinámica ejemplo sobre el que se ha trabajado, la Sección 6 muestra una comparativa de los resultados obtenidos y, finalmente, una sección de conclusiones cierra el artículo.

2 OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

A continuación se resumen los distintos enfoques directos que existen en literatura para resolver un problema de optimización dinámica.

2.1 ENFOQUE SECUENCIAL

Este enfoque, tal y como se muestra en la Figura 1, se basa en resolver el problema de optimización de forma iterativa, alternando un paso de simulación, donde se integra numéricamente el conjunto de DAEs completo, con un paso de optimización, donde el resolvedor u optimizador propone nuevos valores para las variables de decisión teniendo en cuenta los resultados (valor de la función de coste y restricciones) de la simulación.

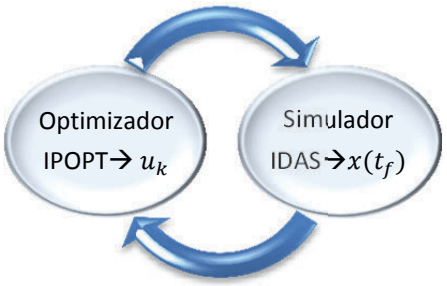


Figura 1: Esquema de resolución secuencial.

El más extendido es el denominado de *integración única* o "single shooting" [8] mediante el cual y, una vez seleccionada una paremetrización a lo largo del tiempo de las acciones de control o de los parámetros respecto a los cuales se va a optimizar, el sistema se integra desde el tiempo inicial al tiempo final (dado por el horizonte de integración) en cada paso de simulación.

Ventajas:

- Problema de optimización con reducido número de variables de decisión (únicamente las correspondientes a la parametrización del control y otros parámetros).
- Buena predicción del comportamiento dinámico de la solución obtenida, debido a la integración rigurosa mediante integradores de paso variable.
- Buen manejo de eventos discretos.

Limitaciones:

- Elevado coste computacional para obtener soluciones en problemas de gran escala y dinámicas complejas (constantes de tiempo muy dispares, sistemas híbridos, etc).
- Incluir restricciones de camino sobre los estados requiere condiciones complejas.
- Los gradientes de la función de coste y de las restricciones son difíciles de obtener (analíticamente o por diferenciación automática), al tener que aplicar la regla de la cadena bajo el símbolo derivada e integral.

Con el objetivo de paliar dicha limitación, se desarrollaron los métodos de *integración múltiple* o "multiple shooting", que proponen dividir el horizonte de integración en n_k intervalos, no relacionados entre sí desde el punto de vista del simulador. Esto proporciona la posibilidad de paralización de tareas en la etapa de simulación (donde normalmente se consume mayor tiempo de CPU), agilizando la resolución del problema. No obstante el problema de optimización crece en tamaño debido a que aparecen nuevas variables de decisión (estados iniciales en cada intervalo) y nuevas restricciones (continuidad entre intervalos) [8].

En este método, las restricciones de camino se pueden incluir más fácilmente en los puntos iniciales y finales de cada intervalo. Sin embargo, esto no garantiza su cumplimiento estricto (a menos que se incluyan explícitamente como en "single shooting") en puntos intermedios de los intervalos.

2.2 ENFOQUE SIMULTÁNEO

En este enfoque, como su nombre indica, se resuelve el problema de optimización y evaluación de las restricciones de forma simultánea, ver Figura 2. Para ello, previamente se requiere convertir el problema dinámico en uno algebraico mediante la discretización del conjunto de DAEs original.

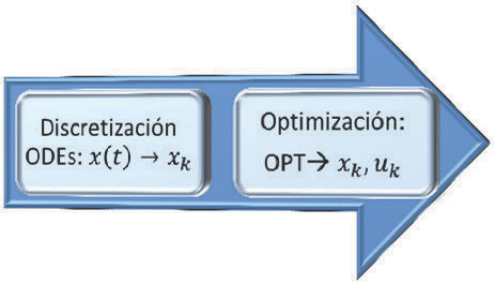


Figura 2: Esquema de resolución simultánea.

Para obtener una buena representación discreta del proceso, en la literatura se recomienda utilizar la técnica denominada discretización por *colocación ortogonal* [5], [7]. Mediante dicha técnica, el hori-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

zonte temporal se divide en n_k intervalos o elementos finitos (no necesariamente uniformes) en los cuales la dinámica del sistema es aproximada por una combinación lineal de polinomios de Lagrange $P_k(t)$ de grado prefijado. Se emplaza al lector a consultar [7] para más detalles.

Ventajas:
- La discretización por colocación ortogonal se puede automatizar de manera muy sencilla.
- Se elimina el cómputo necesario por un integrador para simular el sistema continuo.
- Las restricciones de camino se implementan de forma sencilla (en cada punto de colocación).
- Los gradientes de la función de coste y de las restricciones se obtienen de manera prácticamente exacta y en tiempos de cálculo muy inferiores, gracias a tener un modelo puramente algebraico.

Limitaciones:
- El tamaño del problema de optimización crece de forma elevada tanto en variables de decisión (estados en cada punto de colocación) como en restricciones (restricciones de camino y continuidad entre elementos finitos).
- Es necesario elegir a priori el número de elementos finitos y grado de los polinomios para obtener una adecuada discretización de las ecuaciones diferenciales. Puede que no sea posible representar adecuadamente la dinámica original, sobretodo en problemas con dinámicas muy complicadas.
- Puede ser difícil tratar eventos discretos, debido a que los puntos de colocación se eligen a priori y no existe el concepto de paso variable.

3 CASADI: UN SOFTWARE PARA OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA

CasADi [9], [10] es un paquete de propósito general que proporciona herramientas e interfaces de comunicación destinado al planteamiento y resolución de problemas de optimización dinámica. Está programado originariamente en C++, pero actualmente existe como módulo integrable en Python y como "toolbox" para Octave.

Se puede entender CasADi, ver Figura 3, como un entorno que combina de forma eficiente un motor simbólico con algoritmos de diferenciación automática e incorpora interfaces de comunicación adaptadas para hacer llamadas a distintos integradores numéricos de ecuaciones diferenciales (CVodes, IDAS, etc.) y resolvedores de problemas de optimización no lineal (IPOPT, SNOPT, etc.).

Sin embargo, CasADi ***no*** es un potente y completo motor simbólico (e.g., Mathematica, Maple, etc.), ni un software de diferenciación automática de código fuente en general ni un simulador u optimizador.

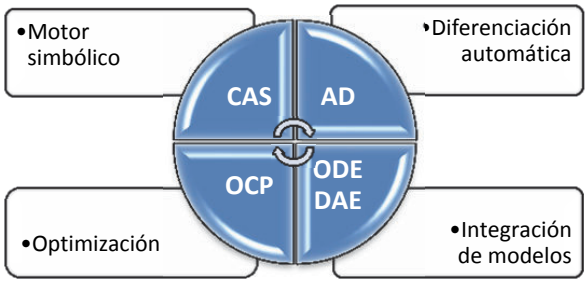


Figura 3: Estructura del paquete CasADi.

Ventajas de CasADi:
- Incorpora el cálculo automático de gradientes y hessianos de manera eficiente y transparente al usuario mediante diferenciación automática, lo que se traduce en una mejora sustancial en tiempo de cómputo.
- Una vez implementado el modelo dinámico, se puede emplear cualquiera de los métodos directos (secuencial/simultáneo) para resolver el problema de optimización dinámica.
- Es de código abierto y trabaja con IPOPT, que es uno de los optimizadores no lineales, basado en algoritmos de punto interior [11], más eficientes hoy en día.

Limitación: Los modelos dinámicos de procesos deben introducirse siguiendo una determinada sintaxis, basada en un lenguaje de modelado estructurado, lo que se traduce en *poca flexibilidad* en la fase de modelado.

4 IMPORTACIÓN DE MODELOS

Como se comentó en el punto anterior, el paquete de diferenciación automática está implementado como un módulo en los lenguajes de programación Python, C++ y una toolbox para Octave. De entre las diferentes opciones, los autores se han decantado por la utilización de Python principalmente por ser un lenguaje interpretado de alto nivel, proporcionar programación multiparadigma y, especialmente, por ser multiplataforma, entendiendo esto último como la posibilidad de ejecutar el mismo código en distintas máquinas sin más que tener un intérprete de Python instalado (por lo que es independiente del sistema operativo que se utilice).

La descripción de modelos dinámicos para CasADi debe realizarse siguiendo una sintaxis específica. Las interfaces que proporciona CasADi para comunicar con integradores y optimizadores externos asumen que los modelos van a ser proporcionados siguiendo una estructura algebraico-diferencial (DAE), tal y como se muestra a continuación:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_{ode}(t,x,z,p) \quad x(0) = x_0 \\ 0 &= f_{alg}(t,x,z,p) \\ \dot{q} &= f_{quad}(t,x,z,p) \quad q(0) = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Dónde las ecuaciones se dividen en diferenciales, algebraicas y de cuadratura, siendo función del tiempo t, de variables de estado x, de variables algébricas z y de parámetros p.

Llegado a este punto encontramos la principal limitación de CasADi: el modelo introducido siguiendo la sintaxis (1) es poco flexible y, si algún componente físico cambia, se añade o desaparece, las ecuaciones en espacio de estados ya no son todas válidas, obligando a reescribir las ecuaciones (1). Aquí es donde aparece la necesidad de conectar las potentes herramientas de modelado orientado a objetos, como EcosimPro, con CasADi.

EcosimPro es un potente software de modelado y simulación que incorpora un lenguaje de modelado orientado a objetos para el modelado y simulación de sistemas continuos y/o discretos. EcosimPro puede ser empleado en cualquier problema que pueda ser formulado como un sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales y eventos discretos. Es por lo tanto un software de simulación de propósito general orientado a objetos y acausal.

Por ello, en este artículo se propone la combinación de ambas herramientas para aprovechar las ventajas derivadas tanto de la diferenciación automática y su utilización en la optimización dinámica (CasADi e IPOPT), como la flexibilidad en el desarrollo y mantenimiento de modelos que proporcionan los lenguajes de modelado orientado a objetos (EcosimPro).

Para la importación en la interfaz de CasADi de los modelos realizados en EcosimPro, se ha desarrollado un script que se encarga de traducir el modelo resultante de EcosimPro a la forma (1). La fase de modelado se muestra en la Figura 4 y consiste en los siguientes pasos:

1. Se realiza el modelado del sistema en EcosimPro empleando toda su potencialidad.
2. EcosimPro genera de forma automática el modelo matemático, entendido como el conjunto completo y final de DAEs y su orden de ejecución, gracias a un asistente gráfico donde se indica que variables corresponderán a variables de estado, de entrada o de contorno del modelo.
3. Dicho modelo matemático se genera automáticamente desde EcosimPro en formato HTML y será utilizado para su posterior transformación a CasADi.
4. Ejecución del "script" desarrollado por los autores. Este fichero, realizado en Python, es un traductor semántico que extrae la información del fichero HTML y genera automáticamente un código de Python con el modelo del sistema en la forma (1).

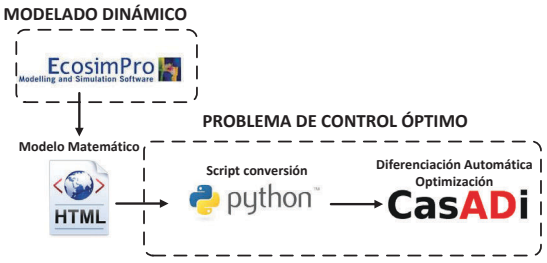


Figura 4: Importación modelos EcosimPro-CasADi.

Estos pasos permiten a los usuarios emplear sus modelos dinámicos en EcosimPro para resolver problemas de optimización dinámica con el paquete CasADi, utilizando cualquiera de los enfoques explicados en la Sección 2. De esta manera, la metodología propuesta permite modelar sistemas de forma flexible en EcosimPro, generar un modelo (interno o simplificado) para la optimización con CasADi, y realizar posteriormente la simulación con otro modelo más detallado y riguroso del proceso (planta), siendo todo ello transparente al usuario final, i.e., se evita la necesidad de remodelar manualmente las ecuaciones en representación interna del modelo cuando varía alguna parte del proceso físico.

La integración de ambas herramientas (EcosimPro y CasADi) proporciona las siguientes ventajas respecto a otras combinaciones disponibles:

- Se emplea un software diseñado íntegramente para el modelado de sistemas dinámicos complejos.
- Se mantiene la coherencia entre las distintas formulaciones del mismo modelo original.
- Estos modelos son exportados a un entorno de programación de alto nivel que posee interfaz con CasADi, lo que permite calcular jacobianos y hessianos de forma exacta. Esta información es fundamental para obtener soluciones precisas y con menores tiempos de cálculo cuando se resuelven problemas de optimización dinámica de cierta envergadura.

5 EJEMPLO

El planteamiento del problema de optimización dinámica se ha realizado directamente sobre la simulación de un equipo industrial concreto y ha sido usado para comparar las soluciones obtenidas con los distintos enfoques del mismo problema de optimización.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para ello se ha modelado en EcosimPro un reactor continuo de tanque agitado con camisa refrigerante en el que tiene lugar una reacción exotérmica de primer orden, donde un reactivo A se convierte parcialmente en un producto B.

5.1 MODELO DEL REACTOR

El modelo dinámico (ver Figura 5) posee 3 estados definidos por: el balance de materia del reactivo A (2), el balance de energía en el reactor (3) y el balance energético en la camisa (4).

$$V \cdot \frac{dC_A}{dt} = q \cdot (C_{A0} - C_A) - V \cdot k \cdot C_A \quad (2)$$

$$V \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{dT}{dt} = q \cdot \rho \cdot (T_e - T) - V \cdot k \cdot C_A \cdot \Delta H - Q \quad (3)$$

$$V_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot \frac{dT_r}{dt} = F_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot (T_{re} - T_r) + Q \quad (4)$$

$$k = 5.967e^{\left(\frac{-826}{(T+273.15)}\right)} \quad (5)$$

$$Q = U \cdot A \cdot (T - T_r) \quad (6)$$

$$x = \frac{C_B}{C_{A0}} = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad (7)$$

Donde:

V: Volumen del reactor (m^3)
V_r: Volumen de la camisa refrigerante (m^3)
C_A: Concentración de A en el reactor (kg/m^3)
C_{A0}: Concentración de A en la alimentación (kg/m^3)
q: Flujo volumétrico de alimentación (m^3/h)
F_r: Flujo volumétrico del refrigerante (m^3/h)
k: Constante cinética de la reacción (1/h)
ρ: Densidad corriente de alimentación (kg/m^3)
ρ_r: Densidad del refrigerante (kg/m^3)
C_P: Capacidad calorífica de la mezcla (kJ/kg K)
C_{Pr}: Capacidad calorífica del refrigerante (kJ/kg K)
T: Temperatura del reactor (ºC)
T_e: Temperatura de entrada de la alimentación (ºC)
T_r: Temperatura media del refrigerante (ºC)
T_{re}: Temperatura de entrada del refrigerante (ºC)
ΔH: Calor de reacción (kJ/kg)
Q: Calor intercambiado (kJ/h)
U: Coef. global de transmisión de calor (kJ/hm^2K)
A: Superf. de transmisión de calor de la camisa (m^2)
x: Ratio de conversión de A en B (adimensional)

5.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo del problema de optimización es maximizar la cantidad de producto B obtenida en el reactor al final de la simulación ($t_f = 10h$), por lo que el problema de optimización a resolver será:

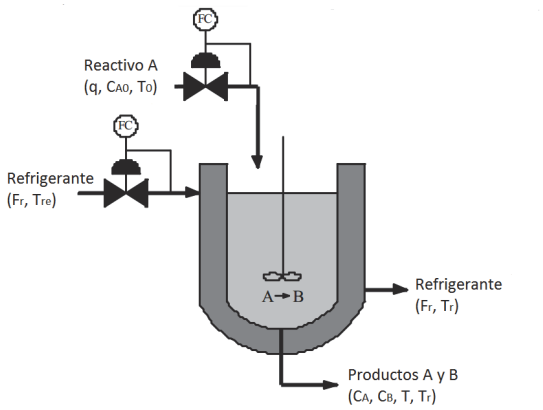


Figura 5: Esquema del reactor continuo encamisado.

$$\underset{(q,F_r)}{minimizar} \quad J = -q(t_f) \cdot C_B(t_f) = -q \cdot \left(C_{A0} - C_A(t_f)\right) \quad (8)$$

sujeto a:

- Modelo del reactor, ecuaciones (2) – (7)
- Límites en el valor final de la conversión del reactivo A (restricción final):

$$0 \leq x(t_f) \leq 1 \quad (9)$$

- Límites en la temperatura del reactor. El refrigerante que circula a través de la camisa debe ser capaz de absorber el suficiente calor de reacción para mantener la temperatura del reactor entre ciertos límites a lo largo de todo el tiempo de simulación (restricción de camino):

$$L_{\text{inf}} \leq T(t) \leq L_{\text{sup}} \quad (10)$$

- La siguiente parametrización temporal para cada una de las acciones de control:

$$u(t) = \begin{cases} u_0 & si\ 0 \leq t < 2 \\ u_1 & si\ 2 \leq t < 4 \\ u_2 & si\ 4 \leq t < t_f \end{cases} \quad (11)$$

Donde u_0, u_1 y u_2 son las variables de decisión asociadas, a calcular por el optimizador.

El problema de optimización resultante es no lineal, tanto en la función de coste como en las restricciones, con acciones de control q y F_r.

5.2.1 Enfoque secuencial

La restricción de camino (10) se implementará en el planteamiento de integración simple con 2 condiciones de la forma:

$$\begin{aligned} \max\left(T(t)\right) &\leq Lim_{\text{sup}} \\ \min\left(T(t)\right) &\geq Lim_{\text{inf}} \end{aligned} \quad (12)$$

Para el planteamiento con integración múltiple, la restricción (10) se ha relajado a cumplir los límites de temperatura en los extremos de los n_k intervalos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

considerados. Esto se traduce en la inclusión al problema de optimización de n_k restricciones algebraicas de la forma:

$$Lim_{\inf} \leq T_k \leq Lim_{\sup} \quad k: 1, \ldots, n_k \qquad (13)$$

Para este proceso en particular, se ha comprobado que tomar $n_k = 15$ intervalos es suficiente para obtener una solución aceptable en cuanto a cumplimiento de las restricciones.

5.2.2 Enfoque simultaneo

En primer lugar, se necesita decidir el número de elementos finitos y puntos de colocación que presenten una buena discretización del sistema. Para ello, se realiza la simulación del proceso en lazo abierto tanto en continuo mediante integración directa de las ODEs, como en discreto mediante una elección de colocación ortogonal a testear. De esta forma se estima un número y distribución de elementos finitos que asegure una representación razonablemente precisa de la dinámica continua.
Para la simulación se ha excitado al sistema con unas entradas de valor constante:

$$q = 5\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h} \qquad Fr = 54.82\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h} \qquad (14)$$

La discretización por colocación ortogonal elegida son $n_k = 8$ elementos finitos con p =5 puntos de colocación cada uno (grado 4 en P_k), definidos por la tabla de coeficientes de Radau. Con el objetivo de obtener una buena representación de la respuesta transitoria, la longitud de los elementos finitos h_i no es homogénea, sino que se han distribuido bajo el siguiente patrón:

$$h = [1,1,1,1,1,1,2,2] \qquad (15)$$

El resultado de la simulación, partiendo de condiciones iniciales $c_A(0) = \frac{2.891kg}{m^3}$, $T_r(0) = 65°C$ y $T_c(0) = 51.5°C$ es el que se muestra a continuación en las Figuras 6 y 7. Como se puede observar, el modelo discretizado predice perfectamente la dinámica del proceso continuo. Por tanto, parece que esta precisión en la discretización es suficiente para abordar el problema de optimización.

Se ha generado un script en CasADi que devuelve automáticamente las ecuaciones algebraicas discretas por colocación ortogonal correspondientes a las DAEs del sistema.

En este enfoque, la restricción (10) se implementa obligando a cumplir los límites de temperatura en cada punto de colocación:

$$Lim_{\inf} \leq T_{ki} \leq Lim_{\sup} \quad \begin{matrix} k: 1, \ldots, n_k \\ i: 1, \ldots, p \end{matrix} \qquad (16)$$

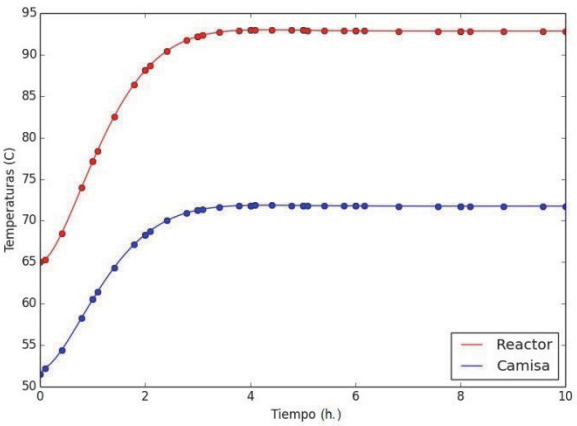


Figura 6: Evolución temperaturas integrando ODEs continuas (líneas sólidas) y usando discretización por colocación ortogonal (marcadores circulares).

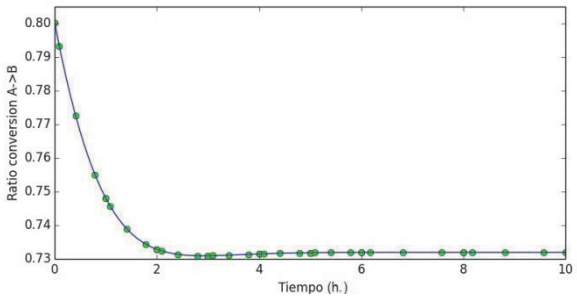


Figura 7: Evolución del ratio de conversión de A en B integrando ODEs continuas (líneas sólidas) y por colocación ortogonal (marcadores circulares).

6 RESULTADOS

En esta sección se presentan y comparan los resultados obtenidos para el ejemplo del reactor, utilizando tanto el enfoque secuencial (integración simple y múltiple) como simultáneo (colocación ortogonal) con IPOPT como optimizador no lineal. En los tres casos, CasADi obtiene los gradientes y hessianos necesarios por el optimizador utilizando diferenciación automática.

Se ha resuelto el problema de optimización planteado en la Sección 5 bajo las premisas y restricciones impuestas anteriormente. Las soluciones obtenidas[1], así como el tamaño del problema de optimización resultante para cada enfoque, se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 8 (acciones de control óptimas).

Finalmente se ha simulado el sistema aplicando las anteriores acciones de control óptimas obtenidas. En las Figuras 9 y 10 se muestra la evolución de los estados del sistema, comparándolos con los puntos de

[1] Todos los cómputos se han realizado en una máquina Intel® Core™ i5 CPU 3.2GHz con 8GB de RAM ejecutando Python 2.7 bajo Windows 7 64 bits SP1.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

muestreo que había predicho el optimizador con el modelo discretizado fijado en la Sección 5.1.

Tabla 1: Resultados de la optimización.

	Integración Simple	Integración Múltiple	Colocación Ortogonal
Variables de decisión	6	51	123
Restricciones	9	67	163
Función Coste	-51.0269	-51.0268	-51.0266
Ratio Conversión x	0.705767	0.705766	0.705765
Tiempo total de cómputo	5.48 s	1.765 s	0.06 s
Caudal de Alimentación	q_1=1.7896 q_2=3.6328 q_3=5	q_1=1.7334 q_2=3.666 q_3=5	q_1=1.7714 q_2=3.6267 q_3=5
Caudal de Refrigerante	F_1=42.16 F_2=51.5 F_3=87.428	F_1=41.93 F_2=51.638 F_3=87.429	F_1=42.054 F_2=51.5 F_3=87.433

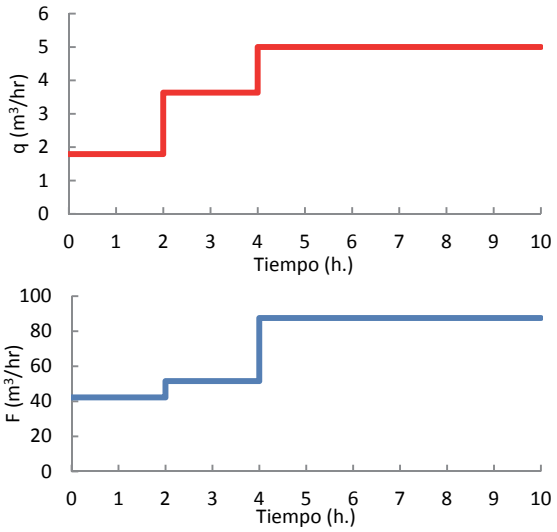


Figura 8: Acciones de control óptimas encontradas, caudales de alimentación q y refrigerante F.

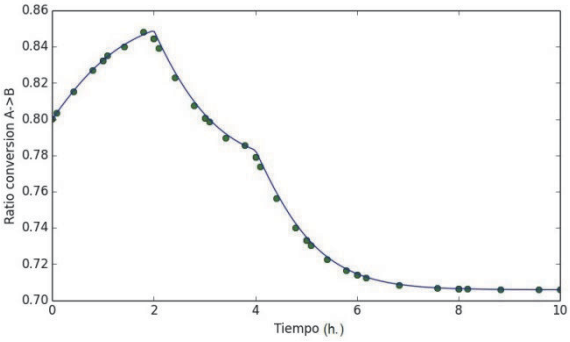


Figura 9: Evolución del ratio de conversión con control óptimo. Los marcadores circulares indican la solución discreta obtenida por colocación ortogonal.

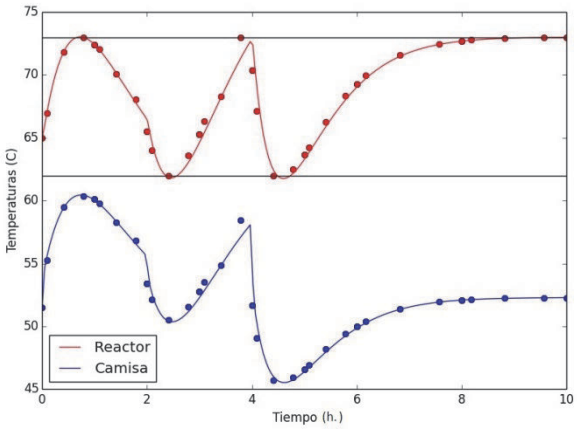


Figura 10: Evolución de temperaturas con control óptimo. Los marcadores circulares indican la solución discreta obtenida por colocación ortogonal.

6.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se puede observar en la Tabla 1, los tres enfoques resueltos en CasADi por diferenciación automática para el cálculo de jacobianos y hesianos encuentran la misma solución (variaciones del orden de 0.1% que se consideran despreciables). En el enfoque simultáneo, esto es posible gracias a una adecuada elección de los parámetros de discretización (patrón de elementos finitos y puntos de colocación): obviamente la simulación a posteriori del sistema continuo con la solución óptima obtenida es necesaria para comprobar que la complejidad elegida en la fase de discretización ha sido suficiente.

Nótese que, a diferencia de la simulación de la Sección 5.2.2, la evolución de los estados con la solución óptima de control que predicen los puntos de colocación no coincide en ocasiones exactamente con la simulación del sistema continuo (ver Figura 10). Esto es debido a que las condiciones impuestas por la colocación ortogonal no fuerzan a que los estados del sistema continuo coincidan con el discreto en los puntos de colocación, únicamente fuerzan a coincidir al gradiente del sistema en dichos puntos [5]. En el caso que el sistema continuo sea puramente polinomial y del mismo grado que el fijado para los polinomios de Lagrange utilizados en la discretización, entonces la discretización por colocación ortogonal sí representa al sistema continuo de forma exacta. En cualquier otro caso, este método solo proporciona una aproximación más o menos precisa dependiendo del número de elementos finitos y puntos de colocación prefijados.

Cabe destacar que, pese a que todos los enfoques llegaron a la misma solución, el secuencial múltiple lo hizo un 25% más rápido que el simple y el simultáneo por colocación ortogonal lo obtuvo empleando menos de un 1% del tiempo que tardó el secuencial simple.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Nótese también que los datos obtenidos para la comparación del enfoque secuencial mediante integración múltiple en este trabajo son simplemente cualitativos, ya que la posibilidad de paralelización de la etapa de simulación que proporciona este enfoque hace que el rendimiento final dependa del número de núcleos/procesadores disponibles, mientras que el rendimiento de las otras propuestas depende casi exclusivamente de la frecuencia máxima de la CPU y de la memoria disponible para resolver cálculos matriciales asociados a jacobianos y hessianos.

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el estado actual de la optimización dinámica de procesos, abordando la problemática existente con las diferentes técnicas y herramientas disponibles. Se hace hincapié en la necesidad de obtener gradientes y sensibilidades precisas de forma rápida para obtener buenas soluciones en la resolución de problemas de optimización con algoritmos que basen la dirección de búsqueda en las primeras y segundas derivadas del modelo. En este sentido, la inclusión de técnicas de diferenciación automática supone un gran avance.

También se han analizado las herramientas software existentes, llegando a la conclusión de que es necesaria una integración (o al menos comunicación) entre los potentes softwares de modelado orientado a objetos junto con los softwares de optimización no lineal que incluyen diferenciación automática (EcosimPro y CasADi en este caso). Ello proporciona al ingeniero de control una buena eficiencia computacional en la resolución del problema de optimización, sin perder flexibilidad en la fase de modelado.

Finalmente, se han comparado, mediante la combinación de EcosimPro y CasADi, los distintos enfoques existentes para resolver un problema de optimización dinámica en un proceso sencillo. Los resultados obtenidos sugieren que el enfoque simultáneo puede proporcionar una extraordinaria ventaja en cuanto a tiempo de cómputo para resolver problemas de gran escala. Sin embargo, queda por estudiar la posible problemática del uso de este enfoque cuando el sistema posea dinámicas complejas (estructura variable asociada a eventos discretos, procesos por lotes, etc.) y dinámicas con constantes de tiempo muy diferentes que hagan complicado la selección de los puntos de colocación ortogonal. De hecho, si un problema requiere de una discretización extremadamente precisa en unas zonas y no tanto en otras, es posible que sea mucho más eficiente usar un integrador numérico de paso variable.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido realizado gracias a la financiación recibida por el Gobierno de España (DPI2012-37859).

Referencias

[1] J. T. Betts, *Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming*, 2nd ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010.

[2] G. Hadley, *Nonlinear and dynamic programming*. Addison-Wesley Publishing Company, Incorporated Reading, MA 06187 USA, 1964.

[3] R. F. Hartl, S. P. Sethi, and R. G. Vickson, "A Survey of the Maximum Principles for Optimal Control Problems with State Constraints," *SIAM Review*, vol. 37, no. 2, pp. 181–218, Jun. 1995.

[4] L. T. Biegler and I. E. Grossmann, "Retrospective on optimization," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, no. 8, pp. 1169–1192, Jul. 2004.

[5] L. T. Biegler, "Solution of dynamic optimization problems by successive quadratic programming and orthogonal collocation," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 8, no. 3–4, pp. 243–247, 1984.

[6] P. E. Gill, W. Murray, and M. A. Saunders, "SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization," *SIAM Journal on Optimization*, vol. 12, no. 4, pp. 979–1006, Jan. 2002.

[7] L. T. Biegler, A. M. Cervantes, and A. Wächter, "Advances in simultaneous strategies for dynamic process optimization," *Chemical Engineering Science*, vol. 57, no. 4, pp. 575–593, Feb. 2002.

[8] L. T. Biegler, *Nonlinear programming: concepts, algorithms, and applications to chemical processes*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics : Mathematical Programming Society, 2010.

[9] J. Andersson, "A General-Purpose Software Framework for Dynamic Optimization," *Tesis doctoral*. Arenberg Doctoral School, KU Leuven, Belgium, 2013.

[10] J. Andersson, J. Åkesson, and M. Diehl, "CasADi: A Symbolic Package for Automatic Differentiation and Optimal Control," in *Recent Advances in Algorithmic Differentiation*, vol. 87, S. Forth, P. Hovland, E. Phipps, J. Utke, and A. Walther, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 297–307.

[11] A. Wächter and L. T. Biegler, "On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming," *Mathematical Programming*, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, Mar. 2006.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

INTEGRACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DE ASISTENCIA AL CIRUJANO EN OPERACIONES LAPAROSCÓPICAS DE PUERTO ÚNICO

M. Cuevas-Rodríguez, B. Estébanez, E. Bauzano, I. Rivas-Blanco I. García-Morales y V.F. Muñoz
Universidad de Málaga, Severo Ochoa, 4, 29590, vfmm@uma.es

L.D. Lledo, J.M. Sabater
Universidad Miguel Hernández. Avda. Universidad s/n. 03202, Elche, j.sabater@umh.es

Resumen

En el presente trabajo se describe la implementación de una plataforma robotizada de asistencia al cirujano en procedimientos de mínima invasión con un único puerto de entrada. Este nuevo sistema permitirá al cirujano planificar la operación en un modo fuera de línea así como manejar un sistema compuesto por diferentes tipos de robots, los cuales colaboran con él durante la intervención. La plataforma robótica se divide en dos elementos principales: un simulador quirúrgico, que representa la cavidad abdominal del paciente y permite planificar la operación fuera de línea, y un sistema robótico que asista al cirujano durante la intervención. Con el objetivo de llevar a cabo este concepto, se ha construido un demostrador y se han realizado una serie de experimentos "in-vitro".

Palabras Clave: robótica quirúrgica, mini-robots, simulador quirúrgico, planificación, incisión única.

1 INTRODUCCIÓN

La técnica de laparoscopia de puerto único o SILS (de su acrónimo en inglés Single Incision Laparoscopic Surgery) ha sido desarrollada recientemente con el objetivo de disminuir el número de incisiones en los procedimientos de Cirugía Mínimamente Invasiva (CMI) [14]. Esta técnica consiste en realizar una única incisión en el paciente, a través de la cual, y utilizando un trocar multipuerto con varias entradas, se introducen las diferentes herramientas, necesarias para realizar la intervención. Con esta técnica surge la necesidad de adquirir nuevas destrezas por parte de los cirujanos, además del desarrollo de nuevas herramientas, lugar donde la robótica supone una ayuda inestimable [17].

En la última década han aparecido diferentes robots asistentes quirúrgicos especializados en cirugía abdominal, estos sistemas trabajan codo a codo con el cirujano, llevando a cabo funciones tales como sujeción de endoscopios [10] o inserción de agujas de punción [11]. En concreto, para las técnicas, los sistemas asistentes tratan de solventar los dos problemas principales que aparecen en este tipo de técnicas, que son, la cercanía de las herramientas entre sí, debido a que todas comparten el mismo puerto limita su rango de movimiento y la proximidad entre las herramientas y la cámara, lo cual provoca una importante pérdida de triangulación [2]. En este punto, la robótica encuentra su campo de actuación con el desarrollando de robots asistentes miniaturizados que realizan una tarea específica trabajando con el cirujano de forma colaborativa. Estos mini-robots se insertan de forma completa dentro del cuerpo del enfermo a través del puerto de entrada único, lo cual permite liberar un importante número de entradas del trocar multipuerto y así mejorar la triangulación y facilitar el manejo de las herramientas por parte del cirujano. El posicionamiento y fijación a la pared abdominal se puede realizar mediante sutura [8], sostenidos por agujas [3], o por interacción magnética, como en [9], [12] y [15]. La principal ventaja del uso de imanes respecto a la sutura o las agujas es el fácil desplazamiento del robot a lo largo de la pared abdominal mediante el guiado de la sujeción magnética exterior.

Los sistemas asistentes suelen proporcionar un interfaz de control directo, como puede ser un Joystick, tracker de la posición de la cabeza del cirujano, control por voz o sistema de ultrasonidos entre otros [16]. Sin embargo la nueva tendencia se dirige a intentar hacer los sistemas asistentes más "inteligentes" y proveerlos de funcionalidades que les permiten ser más autónomos y por tanto requerir menos atención por parte del cirujano. Ejemplos de estos sistemas los vemos en [18], donde se utiliza guiado por imagen para el posicionamiento de una aguja en el interior de la cavidad abdominal por parte de un robot, o Bauzano en [1], que incorpora un sistema de tracker al instrumental para que el sistema asistente conozca la posición de las herramientas del cirujano y realice una asistencia durante la sutura.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Un valor añadido a estos sistemas asistentes consiste en incorporarlos dentro de una plataforma bajo un modelo CIS (Cirugía integrada por Computador) [6], en el cual se considera el uso de diferentes sistemas de ayuda y asistencia al cirujano en las distintas fases de la operación: tanto en la fase pre-operatoria, donde, a partir de modelos anatómicos del paciente, se traza el plan operatorio mediante el uso de navegadores quirúrgicos [4], como en la intra-operatoria, donde se hace uso del sistema robótico asistente [7].

De este modo, en este trabajo se propone una nueva plataforma que integra ambos conceptos: planificación y colaboración durante la intervención, aportando nuevas herramientas útiles para las técnicas SILS. Así, en la fase pre-operatoria, la plataforma presenta un Simulador Quirúrgico, para establecer y programar fuera de línea el plan maestro de la intervención utilizando el modelo del interior de la cavidad abdominal del paciente. Una vez realizada la planificación, comienza la fase intra-operatoria, donde la plataforma ofrece nuevas herramientas que facilitan al cirujano su labor durante la operación. Se trata de un conjunto de mini-robots que se encuentran en el interior de la cavidad abdominal sujetos a ella mediante imanes permanentes y controlados por un brazo robótico externo.

La estructura seguida en este artículo es la siguiente. En primer lugar se realizará una descripción general de la plataforma. A continuación, se hablará con mayor detalle de cada los elementos principales que forman la plataforma, comenzando por el planificador global, en el apartado 3. Seguidamente, en el apartado 4, se detallarán las características del Sistema Robótico implementado. La integración de todos los elementos y los experimentos realizados se exponen en el apartado 5. Finalmente, el apartado 6 presenta las conclusiones de este trabajo.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA

El propósito general del trabajo presentado es proporcionar una plataforma compuesta por un sistema robótico que trabaja de forma colaborativa con el cirujano en intervenciones quirúrgicas de mínima invasión y puerto único, incorporando herramientas de ayuda y diferentes dispositivos robóticos que faciliten la labor del cirujano en la operación, y con ello paliar los principales problemas que presenta dicha técnica. Además del Sistema Robótico, esta plataforma incorpora un Simulador Quirúrgico que permitirá al cirujano planificar la operación fuera de línea antes de intervenir directamente al paciente. Durante la operación, tanto asistentes como cirujano pueden manejar la plataforma mediante un interfaz persona-máquina multimodal. La plataforma se presenta en la Figura 1.

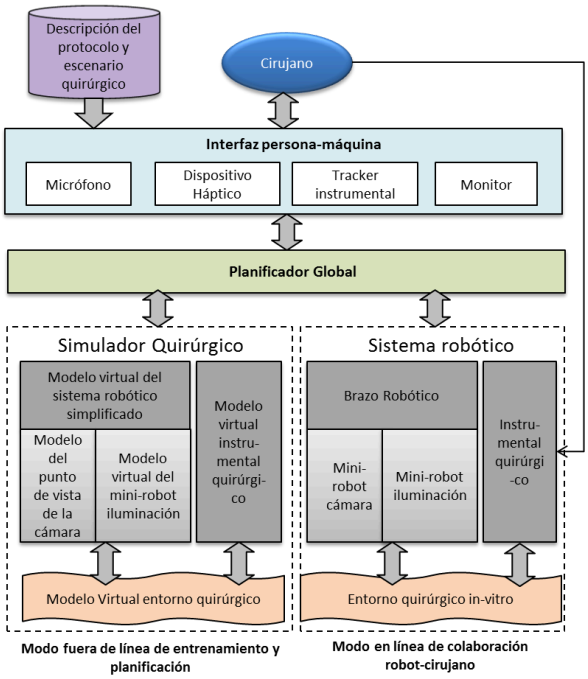


Figura 1: Diagrama plataforma robótica

En la parte superior de la figura, aparece el cirujano, el cual interacciona con la plataforma a través del Interfaz persona-máquina, que incluye los siguientes elementos: dispositivo háptico, un interfaz de voz, un monitor y un localizador 3D de los instrumentos quirúrgicos convencionales. Además, mediante este interfaz se introducen los datos correspondientes al protocolo y escenario quirúrgico, almacenados en una base de datos. Con estos elementos comprendidos en el Interfaz persona-máquina y a través del Planificador Global, el cirujano utilizará la plataforma robótica en dos modos diferentes de funcionamiento, el modo fuera de línea reflejado en el cuadro punteado situado en la esquina inferior izquierda de la figura, y el modo mostrado en la esquina inferior derecha. Cada uno de estos modos se utilizará en una fase diferente de la operación:

- El *modo de funcionamiento fuera de línea – entrenamiento y planificación* es utilizado en la fase del pre-operatorio. En esta primera fase, la plataforma ofrece al cirujano un Simulador Quirúrgico que contiene el modelo de la cavidad abdominal del paciente. En ella, el cirujano realizará tareas de entrenamiento junto con el modelo virtual del sistema robótico, lo que le permitirá familiarizarse con este nuevo concepto de robot colaborativo. Además de entrenamiento, este modo permite al cirujano realizar una planificación de la intervención, donde, en primer lugar se establecerá el plan de trabajo a seguir durante la intervención, y en segundo lugar se programarán los diferentes

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

comportamientos que debe tener el sistema robótico para que actúe de forma colaborativa con el cirujano. Estos comportamientos serán enviados al Planificador Global, el cual constituye la "inteligencia" del sistema robótico colaborativo. El instrumental quirúrgico virtual será manejado por el cirujano a través de dos dispositivos hápticos que ofrece el Interfaz persona-máquina.

- El *modo de funcionamiento en línea – colaboración cirujano-robot* es utilizado en la fase intra-operatoria. En este modo el cirujano llevará a cabo la intervención, tal y como fue planeada en la fase del pre-operatorio, utilizando el instrumental quirúrgico convencional, en un escenario in-vitro y con la asistencia del sistema robótico real. Las posiciones del instrumental son capturadas por un sistema de Tracker 3D, lo que le permitirá al Planificador Global reconocer los movimientos que está realizando el cirujano y generar movimientos automáticos del Sistema Robótico en consecuencia, según lo planificado en el primer modo. El sistema robótico colaborativo está compuesto por dos dispositivos robóticos miniaturizados, uno para obtener la imagen del interior de la cavidad y otro para aportar luz a la escena. Ambos dispositivos se insertan en su totalidad en el interior de la cavidad abdominal del paciente por el puerto único de 4 cm y son sostenidos a la pared mediante imanes permanentes. El imán exterior encargado de la sujeción es controlado y guiado por un brazo robótico.

El Planificador Global constituye la inteligencia de la plataforma robótica y es el que articula la respuesta colaborativa del Sistema Robótico asistente. En función de la maniobra realizada por el cirujano con el instrumental quirúrgico, el planificador decidirá cuál debe ser el comportamiento del sistema y por consiguiente enviará las órdenes correspondientes al sistema robótico. En los siguientes apartados se describirá con detalle tanto el planificador como el Sistema Robótico.

3 PLANIFICADOR GLOBAL

El planificador global es el encargado de almacenar el conocimiento que posee el sistema robótico asistente y utilizarlo para que este trabaje de forma colaborativa con el cirujano. Este módulo contiene: un Gestor de información, que almacena el protocolo de la operación y los diferentes escenarios que debe presentar el Sistema Robótico durante la intervención, un Reconocedor de los gestos, implementado con el objeto de identificar la maniobra quirúrgica que está realizando el cirujano [5], y un Generador de movimientos, que actúa en función de la información ofrecida por los dos bloques anteriores, este último bloque es el encargado de generar los movimientos automáticos del robot en función de la maniobra del cirujano detectada y el comportamiento del sistema robótico planificado en la fase pre-operatoria. El intercambio de información que tiene lugar en este nivel se detalla en la Figura 2.

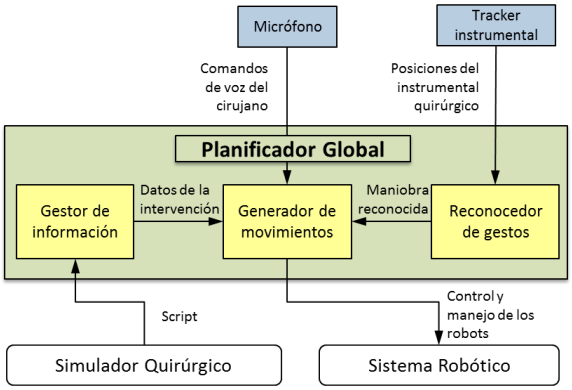


Figura 2: Diagrama planificador global

En la fase pre-operatoria, y haciendo uso del Simulador Quirúrgico, el cirujano planifica la intervención preparando el Script que refleja el plan a seguir durante la operación. Para ello, a medida que el cirujano ensaya el procedimiento quirúrgico irá generando un Script donde quedarán reflejados todos los parámetros que necesita conocer el planificador global para establecer el escenario inicial y generar los movimientos adecuados del robot asistente. Dicho Script contendrá:

- Escenario inicial: posición del trocar por donde serán introducidas las herramientas del cirujano, que servirá como punto de referencia entre el escenario real y el simulado, y posiciones iniciales de los diferentes dispositivos intra-corpóreos.
- Protocolo de la intervención: estados del sistema durante la intervención, en función del orden en el que el cirujano irá realizando las diferentes maniobras.
- Comportamiento del robot: respuesta del sistema robótico antes las diferentes maniobras realizadas por el cirujano durante la intervención

El aspecto del simulador y planificador fuera de línea aparece en la Figura 3, en la que se han mostrado ejemplos de los diferentes tipos de objetos que permite simular y donde se pueden distinguir cuatro partes claramente diferenciadas:

a. Imagen simulada del interior de la cavidad abdominal del paciente y herramientas quirúrgicas.
b. Parámetros de la cámara. Interfaz con botonera para el manejo de la cámara que muestra la imagen simulada. El cirujano podrá desplazar la cámara para obtener el punto de vista óptimo a la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

hora de llevar a cabo una maniobra. Con la barra horizontal elige la distancia que desea que se desplace la cámara y con las flechas indica la dirección de movimiento. A su vez, se podrá seleccionar el zoom a aplicar sobre la imagen.

c. Generador de Script. Con esta sección el cirujano planeará la intervención, creando el script que será interpretado por el sistema robótico en la fase de la intervención. Se planificará por un lado las posiciones iniciales de los diferentes dispositivos y por otro lado la secuencia de maniobras que va a realizar y el escenario que desea que presente el sistema robótico ante esas maniobras.

d. Parte del interfaz que muestra el Script generado.

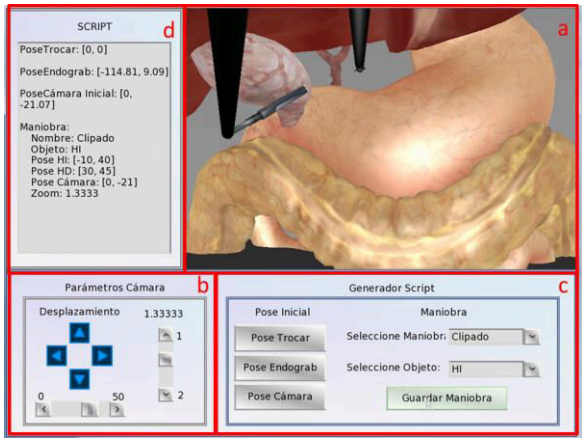


Figura 3: Simulador Quirúrgico

Una vez se ha generado el Script, el Gestor de información se encarga de procesarlo, almacenar y organizar la información y enviársela al Generador de Movimientos. Las entradas y salidas el Generador de movimientos se muestran en la Figura 4.

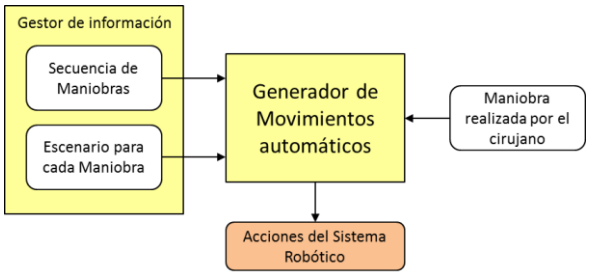


Figura 4: Diagrama del Generador de movimientos

El generador de movimientos conoce por un lado la secuencia de maniobras que se realizará en la operación y el escenario que debe cumplir el sistema robótico para la realización de cada una de las maniobras (entradas del lado izquierdo del diagrama que vienen del Gestor de Información) y por otro, la maniobra que ha realizado el cirujano (entrada del lado derecho del diagrama, que viene del Reconocedor de Gestos). Por tanto, en el momento que el Gestor de Movimientos reciba la maniobra llevada a cabo por el cirujano, indicará al sistema robótico que acciones debe hacer para preparar el escenario planificado para la siguiente maniobra, utilizando las primitivas que se detallarán en el apartado 4.2. De este modo el sistema robótico trabaja de forma colaborativa con el cirujano, preparando el escenario planificado, de forma automática, para cada una de las maniobras de la intervención.

4 SISTEMA ROBÓTICO

El sistema robótico asistente tiene dos modos de funcionamiento. El primero de ellos es el control directo a través del interfaz multimodal y el segundo, el modo automático, donde el sistema es controlado por el Planificador Global para trabajar de forma colaborativa con el cirujano respondiendo a las diferentes maniobras que este realiza con el instrumental quirúrgico. A continuación se presentarán los diferentes elementos del sistema y la arquitectura software utilizada para su integración.

4.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA ROBÓTICO

El sistema robótico está compuesto por un brazo robótico articulado de 7 grados de libertad Barrett WAM y dos dispositivos robotizados intra-corpóreos: un Mini-robot Cámara y Mini-robot Iluminación. Estos dispositivos se introducen en el interior de la cavidad abdominal a través del puerto de entrada único de 4 centímetros de longitud y su sujeción se realiza mediante interacción magnética. La distribución de los elementos en el interior de la cavidad abdominal se muestra en la Figura 5.

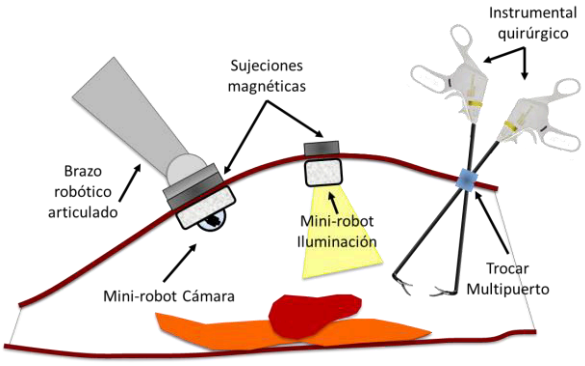


Figura 5: Sistema Robótico

Como se puede observar, los dispositivos se encuentran sujetos en la parte interior de la pared abdominal, esto es debido a las fuerzas magnéticas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

generadas entre los imanes que contienen los dispositivos y las sujeciones magnéticas que se colocan en la parte exterior de dicha pared. Estas sujeciones exteriores son manejadas por el mismo brazo robótico articulado.

El Mini-robot cámara tiene como objetivo transmitir la imagen del interior de la cavidad abdominal, el prototipo de dimensiones 10x3x2 cm puede verse en la Figura 6. Está formado por una cámara Logitech de 5 Megapixeles que emite imágenes en HD 720p con conector usb y 14 LEDs para proporcionar luz a la escena. El segundo dispositivo intra-corporeo, el Mini-robot Iluminación, tiene 3.5 cm de diámetro y se encarga de proporcionar luz adicional a la escena.

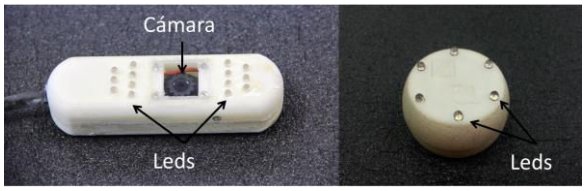


Figura 6: Mini-robot cámara (izquierda) y Mini-robot Iluminación (derecha)

Una de las ventajas de este sistema es que los mini-robots, una vez dentro, pueden alejarse del trocar por donde se introducirán las herramientas, solventando así el problema de triangulación debido a la proximidad de la cámara con las herramientas quirúrgicas. Además, debido a que la cámara puede moverse a lo largo de toda la cavidad, se podrá obtener mayor campo de visión que con los laparoscopios convencionales. Por otro lado, se reduce el número de elementos que comparten el puerto de entrada, resolviendo así el problema de la limitación de movimientos de las herramientas en el exterior. El hecho de tener la iluminación adicional permite cambiar la dirección de la luz según las preferencias del cirujano, evitando así el problema de sombras que provocan pérdida de visibilidad y percepción de la profundidad del escenario.

4.2 ARQUITECTURA SOFTWARE Y HARDWARE DEL SISTEMA

El sistema robótico descrito ha sido desarrollado utilizando la plataforma de desarrollo de código abierto para sistemas robóticos ROS (Robot Operating System). ROS se define como un "*meta-sistema operativo*" para robots, formado por un conjunto de librerías software y herramientas utilizadas para realizar aplicaciones para robots [13]. Creado en 2007 y desarrollado en la actualidad por Willow Garage, el objetivo principal de ROS es apoyar el código reutilizable y la colaboración en el desarrollo de software para robots.

En la Figura 7 se muestra la arquitectura software y hardware del sistema robótico diseñado en este trabajo. Tanto los elementos hardware como las aplicaciones tienen asociado un nodo de ROS, lo cual facilita la comunicación entre todos ellos.

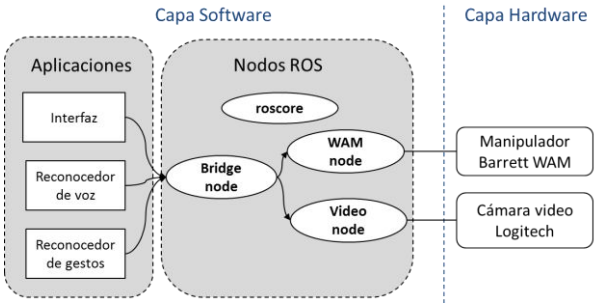


Figura 7: Arquitectura ROS del Sistema Robótico

En la parte izquierda de la figura aparecen las aplicaciones que serán utilizadas en este modo de funcionamiento. El **Interfaz** servirá tanto al cirujano como al asistente para manejar de forma directa los diferentes elementos que forman la capa hardware. El **Reconocedor de voz** registrará los comandos de voz lanzados por el cirujano. A su vez, el **Reconocedor de gestos** identificará las maniobras llevadas a cabo por el cirujano con el instrumental quirúrgico. El nodo **roscore** es el nodo central de ROS, encargado de establecer las comunicaciones entre todos los nodos. La información recogida en las diferentes aplicaciones del sistema será enviada al nodo ROS **bridge_node** utilizando un protocolo UDP. Una vez estos datos se encuentren en el bridge_node (nodo donde se implementa el Planificador Global), este nodo será el responsable de transmitir la información al nodo de ROS que corresponda: el **wam_node** es el nodo encargado de las comunicaciones con el Manipulador Barrett WAM y el **video_node** es el encargado de procesar la imagen enviada por el Mini-robot cámara. Para llevar a cabo la comunicación entre las diferentes aplicaciones y los elementos hardware se han implementado las primitivas enumeradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Primitivas de comunicación

Primitiva	**Descripción**
Guiado Manual	Libera el brazo robótico para moverlo manualmente
Calibracion	Libera el robot para poder moverlo manualmente hacia el soporte de agarre de cada uno de los mini-robots, una vez allí se procederá a la calibración de cada dispositivo, guardando su posición inicial
Camara Calibrada	Indica que el brazo robótico ha sido colocado sobre el Mini-robot cámara para que este sea calibrado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Iluminacion Calibrado	Indica que el brazo robótico ha sido colocado sobre el Mini-robot iluminación para que este sea calibrado
MoverCasa	Envía brazo robótico a la posición de reposo
Mover Direccion	Mueve el brazo robótico una distancia concreta en un sentido determinado (izquierda, derecha, delante, detrás)
Mover Derecha	Mueve el brazo robótico una hacia la derecha
Mover Izquierda	Mueve el brazo robótico una hacia la izquierda
MoverArriba	Mueve el brazo robótico una hacia arriba
MoverAbajo	Mueve el brazo robótico una hacia abajo
Cambiar Dispositivo	Cambia de dispositivo que está manejando el brazo robótico
ZoomIn	Aplica zoom a la imagen enviada por el Mini-robot cámara
ZoomOut	Deshace el zoom de la imagen enviada por el Mini-robot cámara

5 INTEGRACIÓN Y EXPERIMENTOS

Como se ha visto en los apartados anteriores, la comunicación entre el Simulador Quirúrgico y el Sistema Robótico se basa en el envío de un Script donde se reflejan todos los parámetros planificados en la fase pre-operatoria y que debe conocer el sistema en la fase intra-operatoria. En este apartado se demostrará la integración de la plataforma y se describirán los experimentos realizados para estudiar su viabilidad. En primer lugar se detalla el workflow que sigue el cirujano durante la intervención.

- **Workflow de la operación**

Los diferentes estados que tendrán lugar durante la operación se muestran en la Figura 8, divididos en dos bloques principales, el pre-operatorio, donde se hará uso del Simulador Quirúrgico y el intra-operatorio, donde se realizará la intervención en el paciente con la colaboración del Sistema Robótico.

En primer lugar se realiza la adquisición de los datos de paciente, a partir de pruebas ecográficas y un escáner de la cavidad abdominal se obtiene un modelo virtual con las características específicas del paciente a tratar. Una vez conocida la cavidad abdominal y determinado el procedimiento quirúrgico a seguir se inicializa el sistema, seleccionando las herramientas que se van a utilizar y el protocolo de la intervención, quedando establecido el escenario de trabajo. La segunda fase es la de Simulación, en esta fase el cirujano realizará el procedimiento quirúrgico y practicará las diferentes maniobras con la ayuda del sistema robótico virtual. Una vez el cirujano se ha familiarizado con el sistema robótico colaborativo se pasará a la tercera fase de planificación de la operación donde se fijará el comportamiento del sistema robótico ante las diferentes maniobras del cirujano. Cuando la operación ha sido planificada se pasará al estado de intervención en el paciente, donde el cirujano trabajará directamente sobre el paciente con la ayuda del sistema robótico real que realizará una asistencia de forma automática. En estos dos últimos estados son en los que nos centramos en este trabajo por lo que los veremos con mayor detalle a continuación.

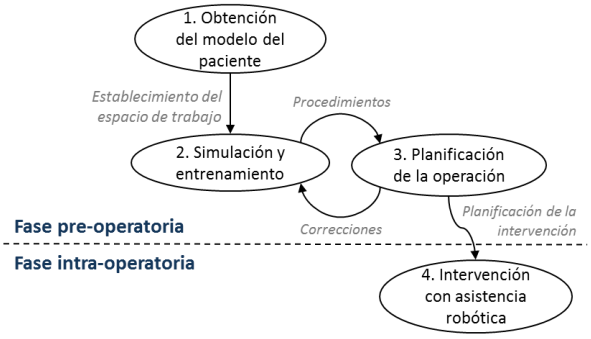


Figura 8: Workflow de la operación

- **Experimentos in-vitro en el laboratorio**

Se han llevado a cabo una batería de pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la plataforma robótica. Para ello se ha elegido la intervención quirúrgica de colecistectomía, esta intervención consiste en la extracción de la vesícula biliar del paciente, la cual se encuentra situado bajo el hígado. Se trata de un procedimiento relativamente largo, por lo que se han seleccionado una tarea específica que tiene lugar en esta intervención: corte el conducto cístico, la cual se divide en las siguientes maniobras:

1. Maniobra 1: exposición del conducto cístico
2. Maniobra 2: clipado del conducto cístico
3. Maniobra 3: corte del conducto cístico

La primera tarea del experimento es realizar la planificación de la intervención haciendo uso del Simulador Quirúrgico mostrado en la Figura 3. El cirujano llevará a cabo la secuencia de acciones mostrada en el diagrama de la Figura 9, donde *n* es el número de maniobras en las que está dividido el procedimiento quirúrgico. La Figura 10 muestra el Script generado con el Simulador.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

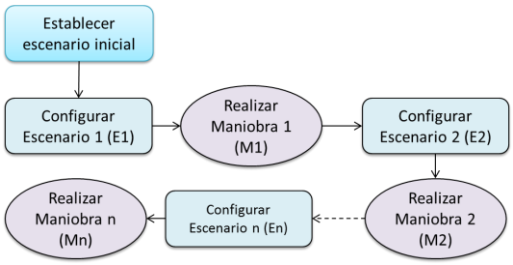


Figura 9: Workflow de la operación

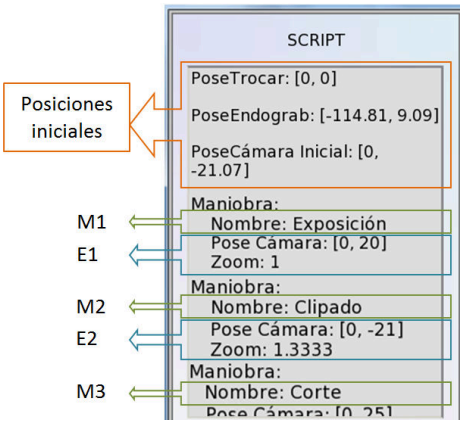


Figura 10: Script generado

Para estudiar la viabilidad y las ventajas del sistema robótico colaborativo, se han realizado diversas pruebas con tres usuarios en el escenario que se muestra en la Figura 11, donde, por un lado, se prueba el funcionamiento de la plataforma con control directo, y por otro con los movimientos automáticos programados en la planificación de la intervención. En el primer caso (a) el cirujano maneja el sistema robótico a través de comandos de voz y con la ayuda de un asistente que, a través del interfaz, controla también el Sistema Robótico. En el segundo caso (b), se activa el reconocedor de gestos y el sistema robótico funciona de forma automática en respuesta a las diferentes maniobras del cirujano. La Tabla 2 muestra los tiempos de cada usuario.

Tabla 2: Tiempo empleado en cada intervención

Usuarios	(a) Control directo	(b) Colaboración automática
User 1	3 min 36 seg	2 min 56 seg
User 2	2 min 18 seg	2 min 03 seg
User 3	4 min 47 seg	4 min 25 seg

Como puede observarse en la tabla, con la colaboración automática del sistema, los tiempos de la intervención se reducen notablemente. En este caso se trata de una intervención sencilla y de poco tiempo, focalizada en una zona concreta de la cavidad abdominal, por lo que la diferencia de tiempos entre el caso (a) y (b) no es muy amplia. Los usuarios opinaron que en el caso de una intervención más larga si sería muy significativa la ayuda del robot ya que esto liberaría de carga al cirujano permitiéndole a este centrar su atención en las tareas que está realizando. Por tanto, este concepto de robot asistente automático no implica una mejora notable de tiempos pero si permite la realización de la intervención de una forma más eficiente y con mejores resultado.

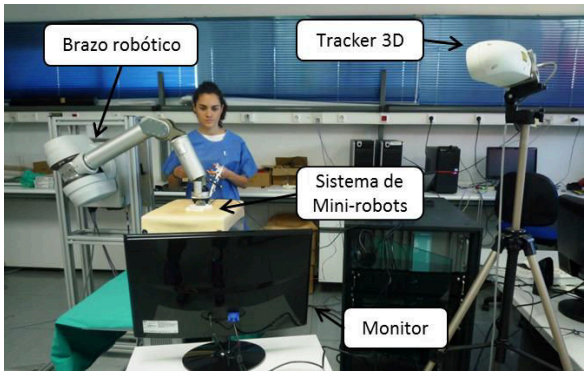


Figura 11: Escenario del experimento

6 CONCLUSIONES

La plataforma propuesta en este trabajo integra diferentes fases para los procedimientos de cirugía con técnicas SILS. Por un lado, en la fase preoperatoria permite realizar un estudio del problema y planificar la intervención, haciendo uso de un simulador que ofrece el modelo real del paciente. Esto ofrece numerosas ventajas, ya que el hecho de tener un modelo individualizado del paciente permite realizar una planificación más eficiente y conocer de antemano los diferentes problemas que pueden aparecer durante la intervención. Con la preparación del plan de trabajo el cirujano programará las diferentes funciones que desea que realice el robot para que en la fase intra-operatoria este le asista de forma automática. En la segunda etapa, fase intra-operatoria, la plataforma proporciona un sistema robótico que colabora con el cirujano durante la intervención. Dicho sistema se compone de una serie de dispositivos que resuelven varios de los problemas más importantes de las técnicas SILS. Esta plataforma sigue una arquitectura ROS, arquitectura modular y distribuida que permite el manejo de numerosos elementos tanto hardware como software de una forma sencilla y eficiente. Se han realizado una serie de experimentos que han permitido comprobar el correcto funcionamiento de la plataforma y comparar las ventajas de su uso respecto a los procedimientos de laparoscopia convencionales.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del proyecto nacional DPI2010-21126-C03.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Bauzano, E., Estebanez, B., Garcia-Morales, I., & Munoz, V. F., 2014. Collaborative Human–Robot System for HALS Suture Procedures. Systems Journal, IEEE (Volume:PP ,Issue: 99). Page(s): 1 – 10, ISSN : 1932-8184.

[2] Bucher, P., Pugin, F. Morel, P., 2010. "Single port access lapaoscopic right hemiclectomy," International Journal Colorectal Dis., Vol. 23, pp. 1013- 1016.

[3] Castro,C.A., Alqassis, A., Smith, S., Ketterl, T., Sun,Y., Ross,S., et al.(2013). A wireless robot for networked laparoscopy. Biomedical Engineering, IEEE Transactions,60(4),930-936.

[4] Chapuis, J.; Schramm, A.; Pappas, I.; Hallermann, W.; et al. (2007) A New System for Computer-Aided Preoperative Planning and Intraoperative Navigation During Corrective Jaw Surgery. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, Volume: 11 Issue: 3 May 2007. Page(s): 274-287.

[5] Estebanez, B., del Saz-Orozco, P., Rivas, I., Bauzano, E., Muñoz, V. F., & Garcia-Morales, I., 2012. Maneuvers recognition in laparoscopic surgery: Artificial Neural Network and hidden Markov model approaches. In Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on (pp. 1164-1169). IEEE.

[6] Fichtinger, G.; Stoianovici, D.; Taylor, R.H (2001) The surgical CAD/CAM paradigm and an implementation for robotically assisted percutaneous local therapy. 30th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. 10-12 Oct. 2001, Page(s):3 – 8.

[7] Fichtinger, G., Kazanzides, P., Okamura, A., Hager, G., Whitcomb, L., Taylor, R., 2008. "Surgical and interventional robotics: Part II". IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 15, Issue 3, pp. 94-102.

[8] Hu, T., Allen, P.K., Hogle, N.J. and Fowler, D.L., 2008. "Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom and lighting", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2948-2953.

[9] Kawahara, T., Takaki, T., Ishii, I. and Okajima, M., 2010. "Development of a broad-view camera system for minimally invasive surgery" 2010 IEEE/RSJ Internatinal Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2810-2815.

[10] Muñoz, V. F., Garcia-Morales, I., Perez del Pulgar, C.,Gomez-DeGabriel, J. M., Fernandez-Lozano, J., Garcia-Cerezo, A., ... & Toscano, R. (2006, May). Control movement scheme based on manipulability concept for a surgical robotic assistant. In Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. (pp. 245-250). IEEE.

[11] Nagel, M., Hoheisel, M., Bill, U., Klingenbeck-Regn, K., Kalender, W. A., & Petzold, R. (2008, March). Electromagnetic tracking system for minimal invasive interventions using a C-arm system with CT option:First clinical results. In Medical imaging (pp.69180G-69180G).

[12] Padilla, B. E., Dominguez, G., Millan, C., & Martinez-Ferro, M. (2011). The use of magnets with single-site umbilical laparoscopic surgery. In Seminars in pediatric surgery (Vol. 20, No. 4, pp. 224-231). WB Saunders.

[13] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T.,et al. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System. In ICRA workshop on open source software (Vol. 3, No. 3.2).

[14] Romanelli, J.R, Roshek III, T. B., Lynn, D. C., Earle, D. B. Single-port laparoscopic cholecystectomy: Initial experience. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques, 24(6):1374, 2010.

[15] Simi, M., Silvestri, M., Cavallotti, C., Vatteroni, M., Valdastri, P., Menciassi, A., & Dario, P. (2013). Magnetically Activated Stereoscopic Vision System for Laparoendoscopic Single-Site Surgery. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 18(3), 1140-1151.

[16] Stefanidis, D., Wang, F., Korndorffer Jr, J. R., Dunne, J. B., & Scott, D. J. (2010). Robotic assistance improves intracorporeal suturing performance and safety in the operating room while decreasing operator workload. Surgical endoscopy, 24(2), 377-382.

[17] Taylor, R. H. (2006). A perspective on medical robotics. Proceedings of the IEEE, 94(9), 1652-1664.

[18] Tovar-Arriaga, S., Tita, R., Pedraza-Ortega, J. C., Gorrostieta, E., & Kalender, W. A. (2011). Development of a robotic FD-CT-guided navigation system for needle placement: preliminary accuracy tests. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 7(2), 225-236.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto usando herramientas interactivas

Maria Langoyo Menasanch, Ramon Costa Castelló
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
marialangoyo@hotmail.com, ramon.costa@upc.edu

Resumen

En este trabajo se presentan un conjunto de herramientas interactivas especialmente diseñadas para el aprendizaje y la docencia de la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto. A diferencia de muchos trabajos previos en este trabajo se caracteriza la respuesta frecuencial de tiempo discreto directamente y no utilizando la transformación bilineal.

Palabras clave: Tiempo Discreto, Respuesa Frecuencial, Interactividad, Docencia, Sysquake.

1. INTRODUCCIÓN

La última década ha conllevado una revolución en los métodos utilizados para la docencia y el aprendizaje de la teoría del control automático [1]. Este proceso de revisión ha introducido las tecnologías de la información (TIC) en el proceso de aprendizaje. Los resultados más significativo son la proliferación de numerosos laboratorios virtuales/remotos y aplicaciones gráficas interactivas que explotan la interactividad y la visualización geométrica [2, 3, 4, 5, 6]. Estas herramientas son de gran importancia durante las clases magistrales, como apoyo a la explicación presentada por el profesor, y también como herramienta de autoaprendizaje para los estudiantes a distancia. En este contexto una de las principales contribuciones de los últimos años ha sido el texto *Control automático con herramientas interactivas* [7], que ofrece un curso introductorio a la teoría clásica de control en tiempo continuo totalmente basado en el uso de herramientas interactivas.

El control clásico presenta un gran número de interpretaciones geométricas y procedimientos gráficos cuyo uso se está reforzando con la introducción de los computadores en los procesos de análisis y diseño de controladores. Además, la teoría de control, y en particular los procedimientos clásicos de diseño, contienen numerosas aproximaciones e hipótesis que simplifican los controladores y los procedimientos de diseño. La introducción de estos conceptos puede ser difícil desde un punto de vista analítico. La representación gráfica y la interactividad pueden ser también de gran ayuda en estos casos.

Estas características han conllevado al desarrollo de diferentes herramientas relacionadas con diferentes temáticas [2]. Entre otras caben destacar herramientas relacionadas con el lugar geométrico de las raíces [8, 9], la respuesta frecuencial [10], el control predictivo [11], el principio del modelo interno [12], los sistemas con retardo temporal [13],el control tipo PID [14], el control con no linealidades estáticas [15], o la robótica móvil [16].

Algunos de los principales retos dentro de este ámbito consisten en la extensión de las herramientas interactivas a otros ámbitos de la teoría de control y la adaptación de las herramientas para su ejecución en plataformas móviles. En este trabajo no se ha abordado directamente el segundo reto. Como herramienta de desarrollo se ha utilizado Sysquake [17]. Esta herramienta está evolucionando mucho y además de soportar un desarrollo multiplataforma se prevé que en el futuro permita ejecución en dispositivos móviles.

Este trabajo presenta un conjunto de aplicaciones interactivas para el estudio de los sistemas de tiempo discreto. Las aplicaciones interactivas servirán de complemento a un texto actualmente en desarrollo [18]. Un precedente de este tipo de trabajo es [21]. Muchas de las aplicaciones que componen el proyecto han sido ya utilizado en la asignatura *Control por Computador* de la titulación de *ingeniería industrial* (plan 94) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB). En este trabajo se presentan un conjunto de nuevas herramientas ligadas al estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto.

La respuesta frecuencial es uno de los principales conceptos de la teoría clásica de control, a diferencia de lo que pasa en los sistemas de tiempo continuo[7] la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto no presenta una estructura clara y fácil de caracterizar a partir de los polos y ceros. Este trabajo pretende contribuir al mejor entendimiento de la misma usando los desarrollos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

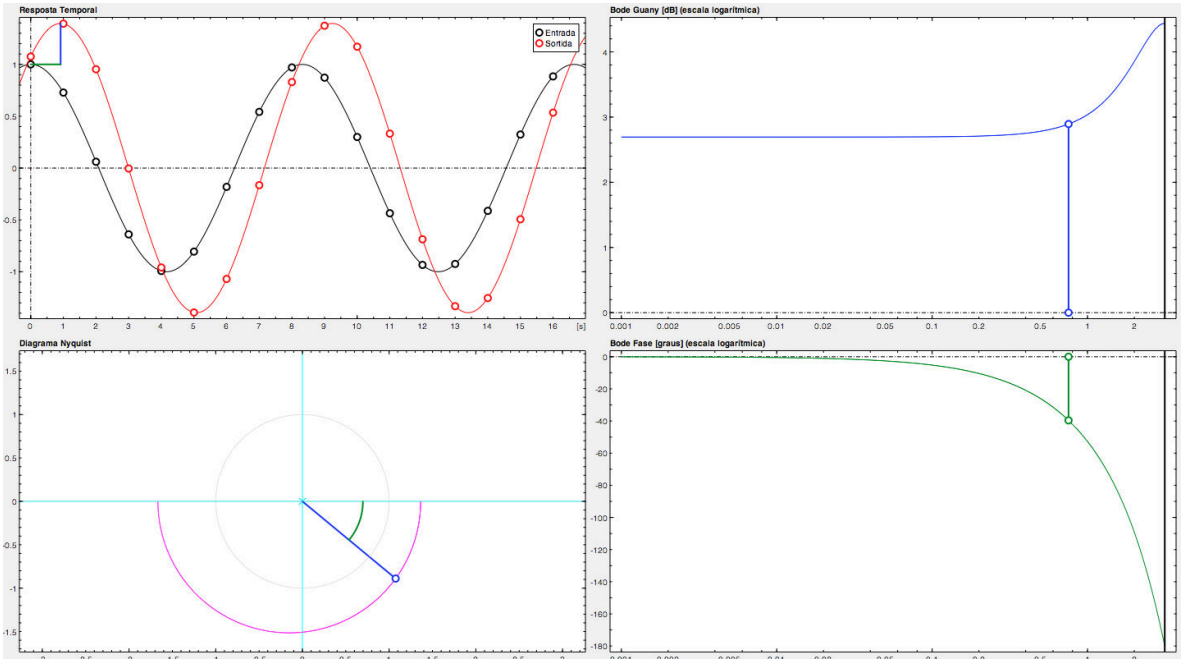


Figura 1: Concepte_frequencial_TD : Vista de la aplicación completa.

disponibles en la literatura [19]. Aunque en muchas ocasiones está ligada el trabajo se centra en los sistemas de tiempo discreto y no aborda la respuesta frecuencial de los sistemas muestreados[20].

Este trabajo está organizado de la forma siguiente. La sección 2 revisa el concepto de respuesta frecuencial para los sistema de tiempo discreto y presenta la estructura de la misma, la sección 3 analiza en detalle la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden y presenta la herramienta desarrollada, la sección 4 analiza en detalle la respuesta frecuencial de los sistemas de segundo orden y presenta la herramienta desarrollada y finalmente la sección 5 describe los objetivos alcanzados hasta el momento y los trabajos pendientes.

2. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE TIEMPO DISCRETO

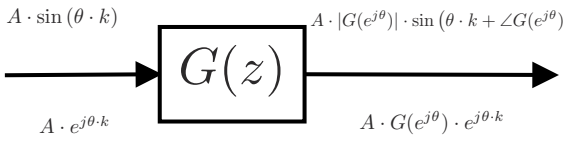


Figura 2: Respuesta temporal de los sistemas lineales estables en régimen permanente.

Dado un sistema lineal de tiempo discreto estable,

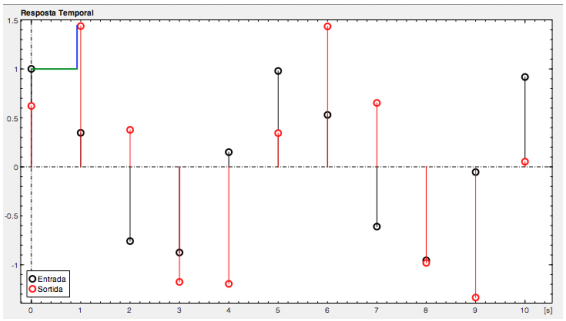


Figura 3: Concepte_frequencial_TD : Visualización de la repuesta temporal como impulsos.

Σ, es bien conocido que si en su entrada se coloca una señal de la forma:

$$u_k = \sin(\theta\, k)$$

la salida, en régimen permanente, es de la forma

$$y_k = M \cdot \sin(k\,\theta + \varphi)\,.$$

Donde,

$$M\, e^{j\,\varphi} = G\left(e^{j\,\theta}\right).$$

siendo $G(z)$ la función de transferencia del sistema Σ. θ recibe en nombre de pulsación normalizada y presenta unidades de radianes. En el caso de sistemas muestreados $\theta = \omega T$ donde ω corresponde a la pulsación real y T corresponde al período de muestreo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

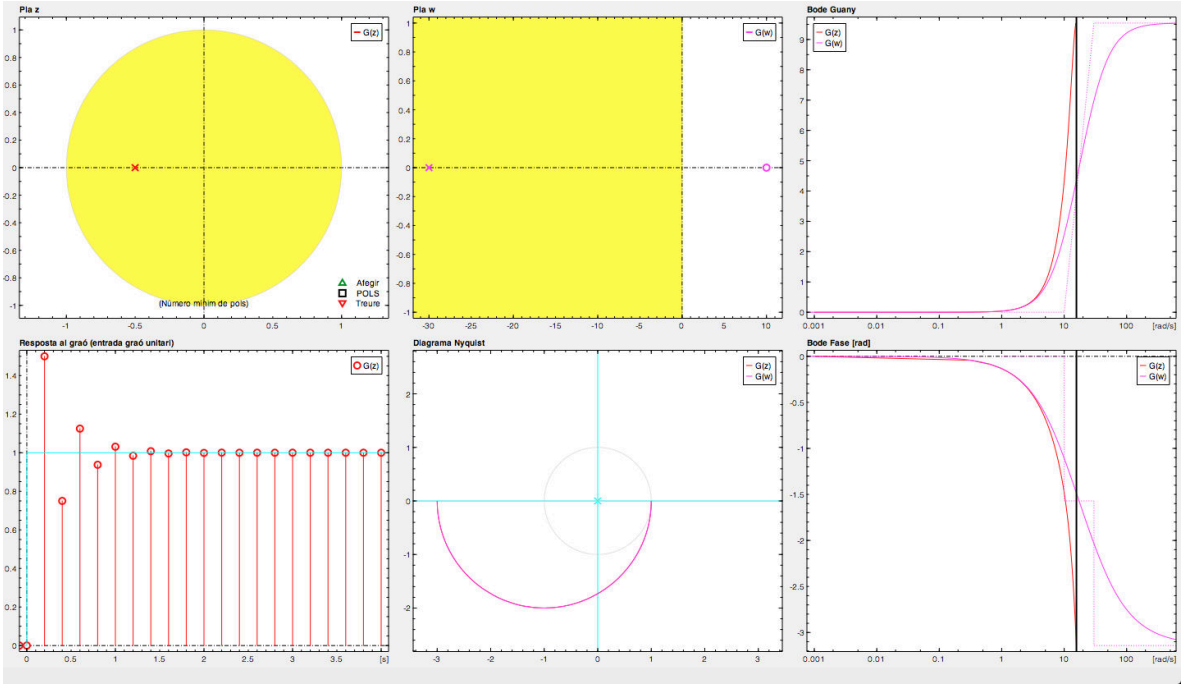


Figura 5: Transformacio_Bilineal_zw: Vista de la aplicación utilizada para ilustrar el efecto de la transformada Bilineal.

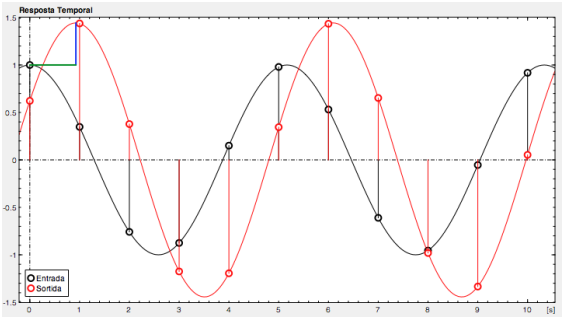


Figura 4: Concepte_TD_sinus_view : Visualización de la repuesta temporal como impulsos con envolvente continua.

Esta relación suele recibir el nombre de respuesta frecuencial de los sistemas lineales. La caracterización de la respuesta frecuencial en las diferentes frecuencias se visualiza gráficamente mediante diferentes diagramas. Siendo las principales el diagrama de Bode que muestra la magnitud y fase de $G\left(e^{j\,\theta}\right)$ en función de la pulsación, el diagrama polar (o diagrama de Nyquist) que corresponde a representar la parte real contra la parte imaginaria y el diagrama de Nichols que corresponde a representar la magnitud contra la fase. Cabe notar que en los dos últimos no aparece explícitamente la frecuencia. La Figura 1 muestra un volcado de pantalla de una aplicación totalmente interactiva especialmente diseñada para ilustrar el concepto de la respuesta frecuencial. Esta visualiza la respuesta temporal y las diferentes representaciones de la respuesta frecuencial.

Una de las dificultades de interpretación de la respuesta frecuencial de tiempo discreto corresponde al hecho que la señal de entrada y salida está únicamente definida en instantes de tiempo concretos. La Figura 3 muestra la entrada y salida de un sistema, como se puede observar resulta complicado visualizar la forma sinusoidal (sobretodo cuando la frecuencia es elevada y por tanto el número de muestras reducido). La Figura 4 muestra esta misma señal visualizando su envolvente. Esta segunda visualización es más fácil de interpretar pero puede crear confusión entre los estudiantes.

Algunas particularidades de la respuesta frecuencial de tiempo discreto son :

- La respuesta frecuencial es periódica: es decir $G(e^{j\theta}) = G(e^{j(\theta+2\pi)})$.
- La respuesta frecuencial es simétrica: es decir $G(e^{j\theta}) = \overline{G(e^{j(\theta-\pi)})}$.
- La respuesta frecuencial se suele pintar en el rango $\theta = [0, \pi]$. Cualquier otro valor es expresable en función de este rango.
- La respuesta frecuencial empieza y finaliza sobre el eje real. $G(1) = G(e^{j0}) \in \mathbb{R}$ y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$G(-1) = G(e^{j\pi}) \in \mathbb{R}.$$

La respuesta frecuencial de tiempo discreto no presenta una estructura asintótica. Esta particularidad hace que sea difícil desarrollar una intuición sobre la forma de la respuesta frecuencial a partir de los componentes de la función de transferencia como se hace en los sistemas de tiempo continuo.

La respuesta frecuencial tiene interés en si misma pues caracteriza el comportamiento de los sistemas, pero presenta además el valor añadido de caracterizar la estabilidad de lazo cerrado a través del criterio de Nyquist [22, 23] (y el simplificado de Bode [22, 23]). Por todo ello resulta de especial interés introducir este concepto a los estudiantes y que estos desarrollen intuición sobre ella.

En muchas ocasiones, y con el objetivo de simplificar la estructura o aplicar métodos de diseño de tiempo continuo en el campo frecuencial se suele utilizar la transformada Bilineal (o transformada de *Tustin*). Esta transforma la respuesta frecuencial de tiempo discreto en otra que presenta características similares a las de la respuesta frecuencial de tiempo continuo, estructura asintótica entre otras. La Figura 2 muestra una aplicación totalmente interactiva diseñada para visualizar el efecto de la transformada bilineal sobre la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto.

Aunque es posible realizar diseño de controladores de tiempo discreto directamente en el campo frecuencial [24, 25, 26, 27], la complejidad de la respuesta frecuencial y la falta de intuición constituyen un cierto freno.

Una función de transferencia, $G(z)$, puede descomponerse de la forma:

$$G(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{k\prod_n (z - z_n)\prod_x \left(z - r_x e^{j\theta_x}\right)}{\prod_l (z - p_l)\prod_m \left(z - r_m e^{j\theta_m}\right)}.$$

Esta decomposición puede usarse para calcular la ganancia de la respuesta frecuencial:

$$\begin{aligned} 20\log_{10}\left(\left|G\left(e^{j\omega}\right)\right|\right) &= 20\log_{10}\left(|k|\right) \\ &+ \sum_n 20\log_{10}\left(\left|e^{j\omega} - z_n\right|\right) \\ &+ \sum_x 20\log_{10}\left(\left|e^{j\omega} - r_x e^{j\theta_x}\right|\right) \\ &- \sum_l 20\log_{10}\left(\left|e^{j\omega} - z_l\right|\right) \\ &- \sum_m 20\log_{10}\left(\left|e^{j\omega} - r_m e^{j\theta_m}\right|\right) \end{aligned}$$

De forma similar la fase puede escribir se la forma:

$$\begin{aligned} \angle\left(G\left(e^{j\omega}\right)\right) &= \angle k \\ &+ \sum_n \angle\left(e^{j\omega} - z_n\right) + \sum_x \angle\left(e^{j\omega} - r_x e^{j\theta_x}\right) \\ &- \sum_l \angle\left(e^{j\omega} - z_l\right) - \sum_m \angle\left(e^{j\omega} - r_m e^{j\theta_m}\right) \end{aligned}$$

Como puede comprobarse la respuesta frecuencial puede caracterizarse a partir del conocimiento de las respuestas frecuenciales de sistemas de primer y segundo orden. Por dicho motivo el conocimiento de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer y segundo orden es de particular interés y puede aportar intuición en la interpretación de la respuesta frecuencial de los sistemas genéricos. En las siguientes secciones se analiza como es la respuesta frecuencial de estos sistemas siguiendo los desarrollos descritos en [19] y se presentan las aplicaciones interactivas desarrolladas para facilitar su estudio.

3. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

3.1. ANALISIS

Como base para el estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden se toma la ecuación:

$$r(z, a) = \frac{z - a}{1 - a}, a \in \mathbb{R} - 1. \tag{1}$$

Esta correspondería a una función de transferencia con un cero en $z = a$ y una ganancia en continua normalizada a 1. A partir de las características de $r(e^{j\theta}, a)$ puede fácilmente caracterizarse la respuesta frecuencial de un sistema de primer orden con un polo en $z = a$ y ganancia en continua unitaria ($\frac{1}{r(z,a)}$).

La respuesta frecuencial de (1) queda definida por:

$$r(e^{j\theta}) = \frac{\cos(\theta) - a}{1 - a} + j\frac{\sin(\theta)}{1 - a}.$$

El módulo de esta función es una función monótona que presenta sus valores extremos en :

$$|r(1)| = 1,\ |r(-1)| = \frac{(1 + a)}{1 - a}$$

en función del valor de a el mínimo o el máximo se produce en la última frecuencia. En concreto, para valores de a positivos, la función describe un perfil paso alto mientras que para valores a negativos la función describe un perfil paso bajo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

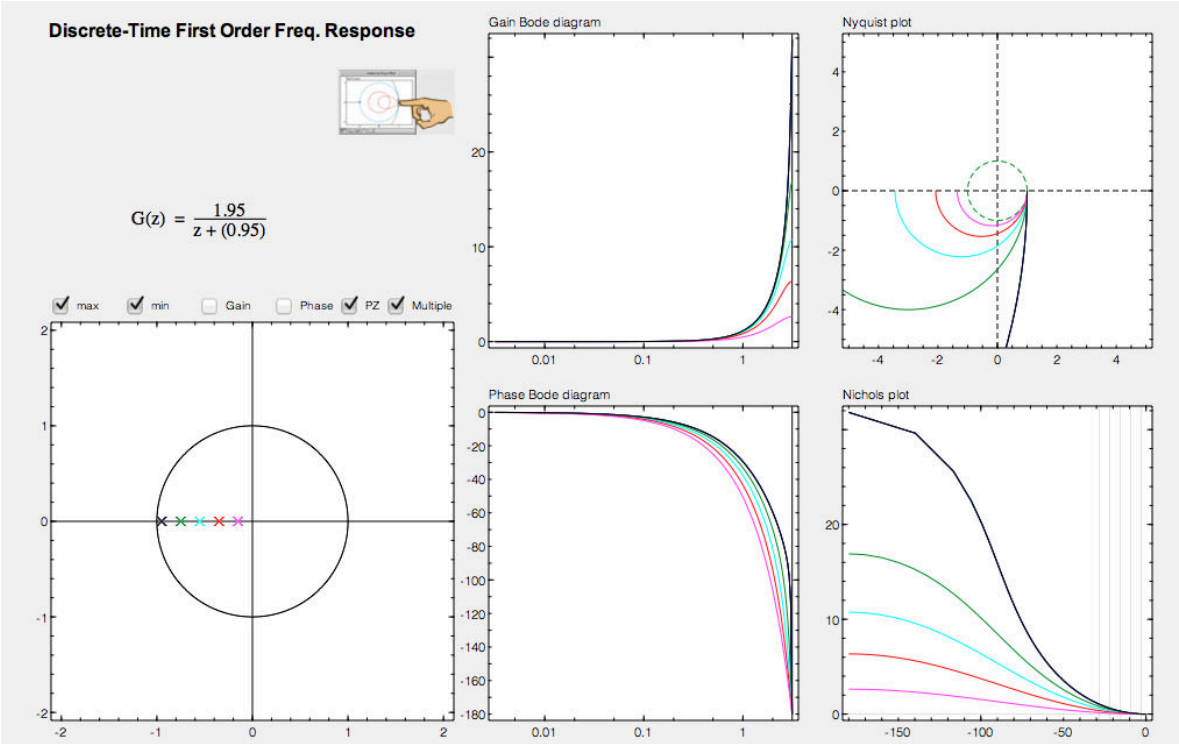


Figura 6: res_freq_TD_1r_ordre: Aplicación para analizar la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden.

La fase de la función es de la forma:

$$\angle r(e^{j\theta}) = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)-a}\right).$$

Cuando a está dentro del círculo unidad la fase es monótona creciente, empieza en 0 rad y acaba en π rad. Cuando a está fuera del círculo unidad presenta un punto singular en: $\theta = \mathrm{acos}(\frac{1}{a})$ en el que toma el valor de $\mathrm{tg}^{-1}\left(-\frac{\mathrm{sgn}(a)}{\sqrt{a^2-1}}\right)$.

3.2. LA HERRAMIENTA

La Figura 6 muestra la aplicación que se ha desarrollado para ilustrar la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden, en la parte izquierda se muestra las características del sistema y se incorpora un editor de polos/ceros que permite cambiar interactivamente su valor. Esta parte incorpora además algunos selectores que permiten modificar las características de la aplicación, activar un visualizador del valor máximo/mínimo de la ganancia o fase, activar la visualización de diferentes sistemas simultáneamente, y finalmente decidir si se trabaja en modo polo o modo cero.

En la parte derecha se muestran los diagramas que ilustran la respuesta frecuencial, Bode, Nyquist y Nichols. Sobre estos diagramas se muestran los indicadores de valores mínimo y máximo tanto en ganancia como en fase. Estos pueden moverse interactivamente, a partir de ellos se actualizan automáticamente los polos/ceros que las generan.

Finalmente la aplicación incorpora un menú que permite cambiar el idioma de la aplicación, cargar algunos ejemplos prediseñados además de reconfigurar la vista de la aplicación.

4. RESPUESTA FRECUENCIAL DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

4.1. ANALISIS

Como base para el estudio de la respuesta frecuencial de los sistemas de primer orden se toma la ecuación:

$$c(z,\delta,\rho) = \frac{z^2 - 2\cdot\rho\cos(\delta)\cdot z + \rho^2}{1+\rho^2-2\cdot\rho\cdot\cos(\delta)}. \qquad (2)$$

Esta correspondería a una función de transferencia con un cero en $z = \rho e^{j\delta}$ y una ganancia en continua normalizada a 1.

La ganancia de (2), $\left|c\left(e^{j\theta},\delta,\rho\right)\right|$, presenta una forma que depende de la región del plano z en que se halle el cero. Estas regiones están indicadas en la Figura 7. Si el cero se halla en las regiones G1,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

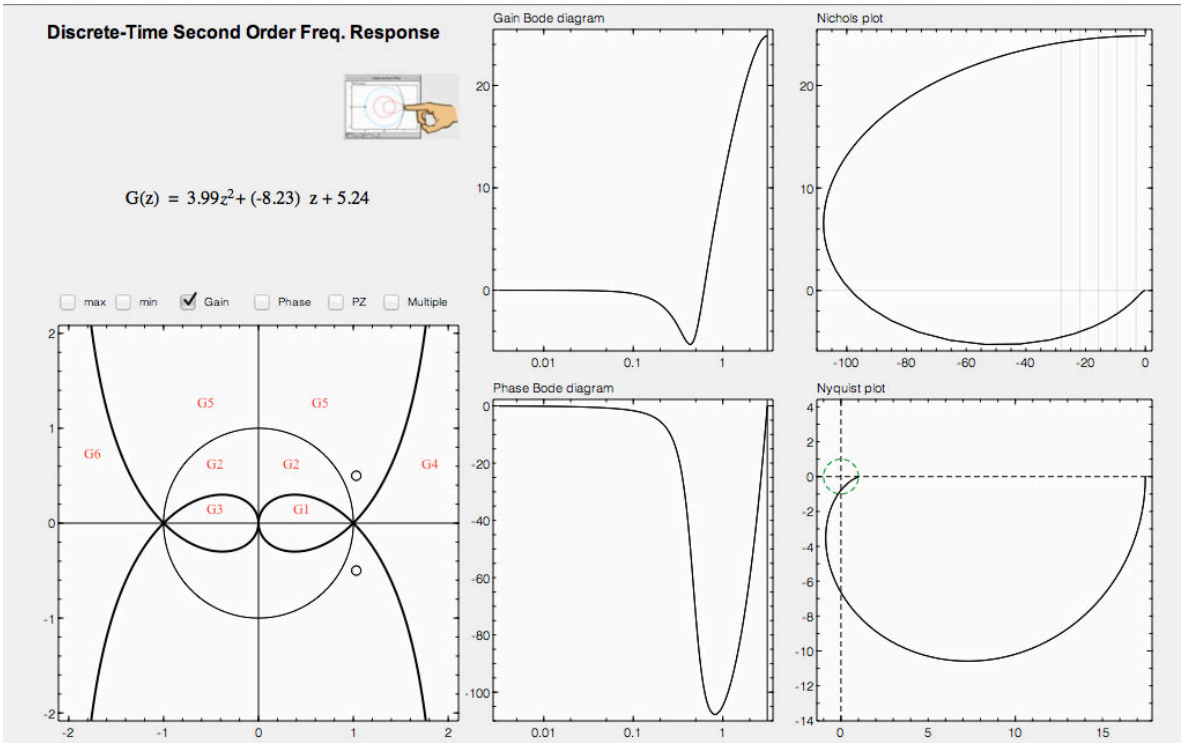


Figura 7: res_freq_TD_2n_ordre: Aplicación para analizar la respuesta frecuencial de los sistemas de segundo orden.

G4, G3 o G6 la evolución es monótona, en el caso de G1 o G4 se trata de una monotonía creciente (paso alto) mientras que en G3 o G6 se trata de una monotonía decreciente (paso bajo). En el caso que el cero pertenezca a G2 o G5 la curva presenta un punto singular en $\theta = \arccos\left(\frac{\cos(\delta)\left(\rho^2+1\right)}{2\rho}\right)$ y la ganancia en dicha frecuencia toma el valor $\sqrt{\frac{(\rho^2-1)^2(\sin(\delta))^2}{(2\,\rho\,\cos(\delta)-\rho^2-1)^2}}$, que es siempre menor que la unidad; en estos casos la respuesta puede ser paso alto o paso bajo (si el cero está en el semiplano derecho es paso alto mientras que es paso bajo si está en el semiplano izquierdo).

La fase de (2), $\angle c\left(e^{j\theta}, \delta, \rho\right)$, presenta una forma que depende de la región del plano z en que se halle el cero. Estas regiones están indicadas en la Figura 8. En la región P7 presenta una evolución monótona creciente, empezando en 0 rad y finalizando en 2π rad. En el resto de regiones la fase presenta uno o dos puntos singulares.

Dado que la regiones de fase y las regiones de ganancia son diferentes puede comprobarse que el tipo de comportamientos cualitativos que pueden obtenerse es bastante numeroso.

4.2. LA HERRAMIENTA

La Figura 7 muestra la aplicación que se ha desarrollado para ilustrar la respuesta frecuencial, en la parte izquierda se muestra las características del sistema y se incorpora un editor de polos/ceros que permite cambiar interactivamente su valor. Esta parte incorpora además algunos selectores que permiten modificar las características de la aplicación, activar un visualizador del valor máximo/mínimo de la ganancia o fase, activar la visualización de diferentes sistemas simultáneamente, y finalmente decidir si se trabaja en modo polo o modo cero. En el caso de trabajar en modo ganancia se activa sobre el diagrama de polos y ceros el dibujo de las regiones de ganancia mientras que si se trabaja en fase se activa el diagrama de las regiones de fase. Ambos tipos de regiones pueden estar activas simultáneamente.

En la parte derecha se muestran los diagramas que ilustran la respuesta frecuencial, Bode, Nyquist y Nichols. Sobre estos diagramas se muestran los indicadores de valores mínimo y máximo tanto en ganancia como en fase. Estos pueden moverse interactivamente, a partir de ellos se actualizan automáticamente los polos/ceros que las generan.

Finalmente la aplicación incorpora un menú que permite cambiar el idioma de la aplicación, cargar

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

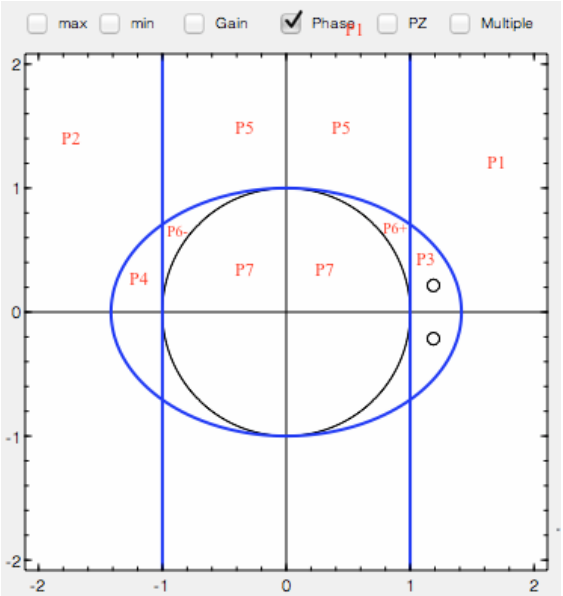


Figura 8: res_freq_TD_2n_ordre: Regiones de estructuración de la fase de la respuesta frecuencial.

algunos ejemplos prediseñados además de reconfigurar la vista de la aplicación.

5. CONCLUSIONES

La respuesta frecuencial es uno de los principales conceptos utilizados en la teoría clásica de control, ya sea para la caracterización del comportamiento de un sistema o para la caracterización de la estabilidad de lazo cerrado. Como se ha podido observar la respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto es bastante más compleja que la que presentan los sistemas de tiempo continuo, además resulta complicado definir conceptos como la frecuencia de corte que son tal útiles y utilizados en tiempo continuo. En este trabajo se han presentado un conjunto de herramientas interactivas diseñadas para dar soporte al estudio de la respuesta frecuencial. Estas aplicaciones son totalmente gráficas e interactivas y forman parte de un proyecto más amplio que pretende vertebrar un curso de *Control por computador* basado en aplicaciones interactivas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos MICINN DPI2011-25649.

Referencias

[1] S. Dormido. Control learning: Present and future. *Annual Reviews in Control*, 28(1):115–136, 2004.

[2] Francisco A. Candelas Herías and José Sánchez Moreno. Recursos didácticos basados en internet para el apoyo a la enseñanza de materias del área de ingeniería de sistemas y automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2):93–101, Abril 2005.

[3] Valeri Kroumov, Keishi Shibayama, and Akira Inoue. Interactive learning tools for enhancing the education in control systems. In 33^{rd} *ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Boulder, CO, 5-8 November 2003.

[4] S. Dormido. The role of interactivity in control learning. In *6th IFAC Symp. on Advances in Control Education*, pages 11–22, 2003.

[5] José Luis Guzman, Ramon Costa-Castelló, Sebastián Dormido, and Manuel Berenguel. Study of fundamental control concepts through interactive learning objects. In *Preprints of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)*, pages 7286–7291, Milano, Italy, August 28 - September 2 2011. ISBN-10: 10/38430 – ISBN-13:978-84-693-1779-2.

[6] Jose Luis Guzmán, Ramon Costa-Castelló, Sebastián Dormido, and Manuel Berenguel. Interactive tools to learn basic concepts of nonlinear systems linearization through a case study. In *9th IFAC Symposium in Advances in Control Education.*, volume 9, Resort Automobilist, Russia, 12-15 December 2012.

[7] José Luis Guzmán Sánchez, Ramon Costa Castelló, Manuel Berenguel Soria, and Sebastián Dormido Bencomo. *Control automático con herramientas interactivas*. Pearson, 2012. ISBN: 9788483227503.

[8] M. Cywiak and M. Castro. Simple technique for root locus plotting. *Revista Mexicana de Física*, 48(6):556–564, December 2002.

[9] Tomás Oliveira e Silva. Automatic generation of root locus plots. *Revista do DETUA*, 2(3):273–276, September 1998.

[10] Erik Cheever and Yue Li. A tool for construction of bode diagrams from piecewise linear asymptotic approximations. *The International Journal of Engineering Education*, 21(2):335–340, 2005.

[11] J.L. Guzmán, M. Berenguel, and S. Dormido. Interactive teaching of constrained generalized predictive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 25(2):52–66, 2005.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[12] Lluis Diaz Guerra, Germán A. Ramos Fuentes, Hector Vargas, and Ramon Costa-Castelló. A virtual/remote laboratory to illustrate the internal model principle for periodical signals. In *The 8th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE2009)*, pages 1–6, Kumamoto, Japan, October 21–23, 2009.

[13] J. Normey-Rico, J.L. Guzmán, S. Dormido, M. Berenguel, and E.F. Camacho. An unified approach for DTC design using interactive tools. *Control Engineering Practice*, 17:1234–1244, 2009.

[14] J.L. Guzmán, K.J. Åstroïm, S. Dormido, T. Hägglund, M. Berenguel, and Y. Piguet. Interactive learning modules for PID control. *IEEE Control System Magazine*, 28(5):118–134, 2008.

[15] S. Dormido, F. Gordillo, S. Dormido-Canto, and J. Aracil. An interactive tool for introductory nonlinear control systems education. In *15th IFAC World Congress b '02*, pages 11–22, Barcelona, Spain, 2002.

[16] J.L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel, and S. Dormido. Interactive tool for mobile robot motion planning. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(5):396–409, 2008.

[17] Y. Piguet. *SysQuake 5: User Manual.* Calerga Sàrl,, Laussane, Switzerland, 2009.

[18] Ramon Costa Castelló and Enric Fossas. *Sistemes de Control en Temps Discret.* Edicions UPC, 2014. ISBN: 978-84-9880-492-8.

[19] Bernardo A. León de la Barra and Raul Prieto. On the frequency response of scalar discrete-time systems. *Automatica*, 35:1843–1853, 1999.

[20] Y. Yamamoto and P.P. Khargonekar. Frequency response of sampled-data systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 41(2):166–176, Feb 1996.

[21] Roland Longchamp. *Comande Numériques de Systeèmes Dynamiques. Cours dÁutomatique.* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Laussane, 2006.

[22] Benjamin C. Kuo. *Digital Control Systems.* The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. Oxford University Press, second edition edition, 1999. ISBN-10: 0195120647.

[23] Katsuhiko Ogata. *Discrete-Time Control Systems.* Prentice Hall, second edition edition, 1995. ISBN-10: 0130342815.

[24] K.S. Yeung and K.Q. Chaid. Bode design formulas for discrete compensators. *Electronics Letters*, 22(24):1304–1305, November 1986.

[25] Manuel F. Pérez Polo, José Ángel Berná Galiano, and Javier Gil Chica. Diseño gráfico de filtros digitales de avance y retardo de fase. aplicación a la enseñanza de control por computador. In *XXVI Jornadas de Automática.*, pages 1–14, Alicantte, 2005.

[26] William Messner. Simple formulas for direct design of discrete-time lead compensators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 122(2):358–360, January 1999.

[27] R. Zanasi and Stefania Cuoghi. Direct method for digital lead-lag design: analytical and graphical solutions. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2011 IEEE Conference on*, pages 804–809, 2011.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano

Jorge A. Díez, Francisco J. Badesa, R. Morales, L.D. LLedó J.M. Sabater, N. García-Aracil
Neuroingeneiría Biomédica, Universidad Miguel Hernández de Elche
email: jdiez@goumh.umh.es, nicolas.garcia@umh.es

Resumen

En este artículo se plantea el diseño de un dispositivo de rehabilitación de mano, que irá incorporado en un robot de rehabilitación de brazo, y se analiza una primera aproximación a la solución. Para ello se plantean los requisitos que debe cumplir el dispositivo, basados principalmente en la sencillez y modularidad, para luego extraer un mecanismo que los cumpla satisfactoriamente. Este diseño preliminar se analiza desde el punto de vista teórico mediante simulación dinámica. Los resultados teóricos se comprueban cualitativamente mediante un prototipo. Finalmente se analizan los puntos fuertes del diseño y los aspectos a mejorar

Palabras clave: Diseño de robots, Robótica de Rehabilitación

1 Introducción

En las próximas cuatro décadas se espera que la población mayor de 60 años se incremente en un 50%, desde los 274 millones de personas en 2011 a los 418 millones que se prevé en 2050 [1]. Este hecho implica la escalada en importancia de las enfermedades relacionadas con la edad, entre las cuales los accidentes cerebrovasculares (ictus) son la principal causa de discapacidad permanente en los países industrializados. Así, la Organización Mundial de la Salud en 2008 clasificó el ictus como una de las cinco enfermedades crónicas principales[2].
Para recuperar la independencia en la vida diaria de las personas que han sufrido un ictus, la terapia de recuperación de movilidad juega un papel fundamental. Los estudios en neuroplasticidad concluyen que la ejecución activa de movimientos en un entorno con sentido es crucial para la restauración de la capacidad motora del miembro afectado por el ictus[3].
Los pacientes pueden necesitar un elevado control de la movilidad de la mano antes de reincorporar la extremidad superior afectada en las actividades de la vida diaria. Así para una rehabilitación completa, es necesario tratar no sólo el brazo, sino también la mano[4].

El uso de dispositivos robóticos puede mejorar la experiencia en la rehabilitación, aportando al paciente motivación, aumentando la intensidad de la terapia, previniendo movimientos adecuados, etc [5]. Los sistemas de rehabilitación de mano se pueden clasificar en:

- Dispositivos de "control de efector final": Las fuerzas se aplican en el extremo distal de los dedos. Tiene como ventaja la posibilidad de controlar de forma sencilla cada dedo, pero de una forma limitada pudiendo llegar a producir movimientos anormales, debido a la falta de control en las juntas proximales. Un ejemplo de esta configuración es el robot Amadeo[6].

- Control en las articulaciones: Se aplica un par en cada articulación del dedo con una relación fija, por lo que permiten el movimiento de cada dedo teniendo un mayor control de las articulaciones proximales. Sin embargo, la relación de par fija puede llevar también a movimientos anormales. El robot Cybergrasp[7] utiliza esta configuración.

- Objetos actuados que se pueden expandir y contraer: Su equipación al paciente es sencilla pero obtener rangos de movimiento amplios presenta gran dificultad. Los robots InMotion Hand Robot[8] y Reha-Digit[9] son ejemplos de este tipo de dispositivo.

- Exoesqueletos: Este tipo de robots tienen sus grados de libertad alineados con las articulaciones de la mano, permitiendo un control directo sobre las articulaciones por separado. Sin embargo, debido a la complejidad cinemática de esta extremidad, deben realizarse simplifiaciones en su diseño y control. También presentan la dificultad de su instalación sobre la mano de los pacientes, que pueden tener características muy variables.Algunos ejemplos de este tipo de configuración son Hand Mentor[10], Hand of Hope[11] y ManovoSpring[12].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 Descripción de PUPArm

El dispositivo robótico a diseñar pretende ser un módulo complementario a otro sistema de rehabilitación mayor, desarrollado por el grupo de Neuroingeniería Biomédica (NBIO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en adelante PUPArm[13].
PUPArm se basa en un mecanismo de cuatro barras, configurado como un manipulador genérico planar optimizado para terapias de rehabilitación de extremidad superior. El robot se compone de una mesa a la que va fijado el manipulador planar, una pantalla en la que se muestran, en coordinación con el movimiento del robot, las distintas actividades a realizar y un ordenador encargado de implementar el control en tiempo real (Figura 1).

Figura 1: Partes del PUPArm

Este robot utiliza actuadores neumáticos giratorios para garantizar la seguridad del usuario gracias a la compresibilidad del aire, así como por su alta relación fuerza-peso que permite ejercer fuerzas considerables siendo relativamente ligeros.

3 Diseño del dispositivo

El diseño pretende reemplazar la órtesis del efector final del robot PUPArm de forma que el sistema completo pueda realizar cojuntamente movimientos de brazo y de mano.

3.1 Requisitos

El diseño debe cumplir los siguientes requisitos:

- Sencillez: No debe complicar en exceso la configuración del robot completo.
- Modularidad: Debe poder acoplarse y desacoplarse fácilmente al PUPArm, pudiendo utilizarse por separado.
- Seguridad: Siguiendo la filosofía de diseño del PUPArm se debe evitar movimientos fuera de las capacidades del paciente, que puedan provocarle daño.
- Un grado de libertad: En relación a la sencillez, se busca que el dispositivo pueda inducir sobre la mano movimientos de flexión y extensión simples. Estos ejercicios han demostrado ser eficaces en la recuperación de movilidad de la mano[14].
- Rango de movimiento: Cumpliendo los requisitos anteriores se debe procurar conseguir el máximo rango posible de apertura de la mano.
- Tamaño y peso reducido: El dispositivo irá acoplado al efector final del PUPArm, así que debe ser pequeño y ligero para no incrementar excesivamente la inercia y las dimensiones del extremo del robot.
- Ergonomía: Dado que el dispositivo interacciona estrechamente con un ser humano, el diseño debe ajustarse a la forma y postura de la mano, de manera que el paciente se sienta cómodo durante la sesión de rehabilitación.

3.2 Solución propuesta

Atendiendo al criterio de sencillez y modularidad, y dado que solo se requiere un grado de libertad, se ha optado por una configuración de "objeto actuado", que unirá las cadenas cinemáticas del PUPArm y brazo del paciente, cerrando así la cadena cinemática y añadiendo el control de la apertura de la mano.
Al igual que en el PUPArm se emplearán actuadores neumáticos, que permiten obtener fuerzas relativamente grande con pesos reducidos, además de ser más seguros interaccionando con humanos que otro tipo de motores.
En esta fase de diseño la ergonomía no jugará un papel relevante puesto que primero se desea obtener un mecanismo factible que cumpla de manera satisfactoria el resto de requisitos, para en una etapa posterior adaptarlo a las formas y posturas del cuerpo humano.
El desafío de diseño reside en combinar la sencillez y la amplitud de movimientos con el tamaño y peso reducidos, ejerciendo sobre la mano un par suficiente. La ventaja mecánica de un mecanismo va en detrimento de la amplitud de movimientos, por lo que será necesario alcanzar una solución de compromiso.
Utilizar mecanismos de barras para resolver el problema resulta en sistemas complejos y voluminosos o en actuadores demasiado pesados, además de producir un par en el eslabón final excesivamente irregular. Una solución que parece satisfactoria se basa en una combinación de cuña

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

con un mecanismo tipo leva (Figura 2).

Figura 2: Concepto del mecanismo propuesto

Un cilindro neumático hace avanzar la cuña forzando a las levas a abrirse. Los ejes de estas estarán situados próximos(o coincidentes)con los ejes de las articulaciones metacarpofalángicas y las falanges se moverán solidariamente a la leva, provocando la apertura y extensión de la mano.
Dado que la flexión no suele ser problema para el paciente, el cierre del mecanismo se realiza mediante un resorte de tracción que une ambas levas, que tenderá a atraerlas una vez el cilindro deje de tener alimentación.

Se ha optado por el uso de actuadores lineales en lugar de giratorios, puesto que los primeros tienen mayor fuerza específica. En concreto, en el diseño se utilizará un cilindro DFK-16-40P (120 N a 6 bar, con carrera de 40 mm) de Festo, con cuerpo de polímero, ya que desarrolla una fuerza similar a su equivalente metálico pero siendo más ligero, minimizando el incremento de inercia del efector final del robot PUPArm. El cilindro además irá estrangulado para evitar que se acelere excesivamente y pueda inducir movimientos bruscos en la mano del paciente.

4 Análisis de solución propuesta

Se ha realizado un primer análisis para obtener una aproximación inicial a las dimensiones que debe tener el sistema para realizar un par suficiente sobre las articulaciones metacarpofalángicas de la mano del usuario, sin comprometer en exceso el rango de movimiento del mecanismo. Dada la falta de datos de pacientes reales propios, el par de diseño será de 2 Nm con el mecanismo extendido, basado en los ensayos de otros dispositivos similares[15].
La forma del perfil de las levas es un factor fundamental para alcanzar un compromiso entre la curva de par desarrollado por el mecanismo y la apertura que puede conseguirse. Así, se ha optado por una simulación numérica, en lugar de una aproximación analítica, puesto que la expresión analítica del perfil de la leva complica las ecuaciones a manejar. Utilizando la simulación podrá tenerse en cuenta además la acción de la fricción entre elementos y el amortiguamiento provocado por el estrangulamiento neumático del actuador. Las dimensiones y formas iniciales se han obtenido para unas condiciones fijas:coeficiente de fricción cuña-leva de 0.15, amortiguamiento nulo, fuerza ejercida por el cilindro de 100 N (por debajo de la teórica del utilizado)y resorte de 1 N/m. El dimensionamiento resultante permite el rango que movimiento que se muestra en la Figura 3.

Figura 3: Posición cerrada (trazo continuo) y posición abierta (trazo discontinuo)

4.1 Simulación Dinámica

Existe incertidumbre en los coeficientes de fricción reales, así como en el valor de amortiguamiento equivalente a distintos grados de estrangulamiento, por lo que se han realizado diversas simulaciones variando estos parámetros, para comprobar el desempeño del mecanismo bajo distintas condiciones operativas. Se parte de un coeficiente de fricción de 0.15 (Acero-Bronce), un amortiguamiento de 1 Ns/mm (basado en una limitación razonable de la velocidad del cilindro), resorte de 1 N/m de rigidez que se mantiene en todos los casos, fuerza de cilindro de 100 N. A partir del estado de referencia, se ha variado la fricción y el amortiguamiento de manera independiente para obtener la dependencia del par y apertura máxima respecto de estos parámetros (Figura 4).

De los resultados se observa que el amortiguamiento no afecta de manera significativa a la apertura y el par, aunque sí a la velocidad y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 4: Par sobre una leva en función de ángulo recorrido

por tanto al tiempo de apertura. Sin embargo, los tiempos de apertura en todo momento son del orden de segundos, por tanto se concluye que el amortiguamiento no es un factor limitante en el diseño. El coeficiente de fricción, sin embargo, sí afecta de manera importante al desempeño del mecanismo, cuanto mayor es éste menor es la apertura conseguida aunque se consigue un ligero aumento del par ejercido. Por lo tanto, en la elección de materiales se deberá procurar minimizar el rozamiento. Se ha utilizado la Figura 2 del articulo de Lum[15] como curva de referencia para contrastar las simulaciones con datos reales. El par teórico en todos los casos es mayor que el de la curva de referencia, así que se espera que el diseño pueda ejercer un fuerza suficiente durante la terapia.

4.2 Prototipo

Una vez obtenidas teóricamente las dimensiones del dispositivo, se ha procedido a construir un prototipo simplificado (Figura 5) del mecanismo con el fin de evaluar cualitativamente su funcionamiento, teniendo en cuenta otros factores difíciles de incluir en las simulaciones como son los errores de ejecución en las formas, holguras en ejes, deformaciones de material, desgastes,etc.
Tanto la cuña como las levas se han realizado mediante impresión 3D, utilizando una impresora de deposición fundida comercial, por lo que no se espera una gran precisión dimensional. El material empleado es PLA, cuyo coeficiente de fricción se considerará como 0.16[16].

Figura 5: Prototipo construido

La prueba efectuada sobre el modelo consiste en aplicar distintas presiones sobre el cilindro mediante una válvula reguladora de presión, mientras un individuo sin problemas de movilidad en la mano sostiene ambas levas. A presiones entre 4 y 6 bar, el mecanismo es capaz de vencer sin dificultad el par ejercido por las articulaciones metacarpofalángicas de los sujetos y completar el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

movimiento de apertura.
El prototipo, como se previó, presenta muchas holguras y desalineaciones, a pesar de ello el funcionamiento es el esperado, por lo que se ha decidido seguir con el concepto de diseño.

5 Conclusiones y trabajos futuros

De los cálculos y experimentaciones se concluye que la configuración elegida presenta suficientes ventajas y particularidades como para seguir adelante con su desarrollo. Por un lado el mecanismo es extremadamente sencillo, contando con pocos componentes y actuadores susceptibles de fallar. Por otro lado, se trata de un sistema robusto, relativamente insensible a cambios de condiciones operativas e imperfecciones de fabricación, como se ha comprobado durante la simulación y el ensayo. Estos factores influirán positivamente en los costes de fabricación y mantenimiento.

Por otro lado, aparenta ser un dispositivo flexible ya que las formas de leva y cuña se pueden adaptar fácilmente a distintos perfiles de par y terapias. Si se opta finalmente por la fabricación de las levas y cuña mediante impresión 3D, son susceptibles de personalizarse para cada paciente a coste relativamente bajo. Una ventaja adicional de la personalización es la potencial simplificación del sistema de control asociado al mecanismo, puesto que la forma del perfil de la leva puede sustituir a la componente diferencial y el estrangulamiento del cilindro a la integral, siendo necesario únicamente el control proporcional de la presión sobre el cilindro.

Aunque aún quedan multitud de factores a ajustar. Los trabajos futuros se centrarán en en generar un primer modelo que pueda probarse en un paciente real. En primer lugar se debe introducir la ergonomía como factor de diseño, es necesario pensar una forma cómoda y sencilla de acoplar la mano del paciente al dispositivo. También se pretende ampliar el rango de movimiento, dado que se dispone de un exceso de par considerable es posible sacrificar ventaja mecánica para conseguirlo.

En resumen, la sencillez mecánica y de control, junto al posible aprovechamiento de la tecnología de impresión 3D son los que otorgan a este concepto de diseño su potencial para ofrecer una alternativa sencilla y eficaz en las terapias de rehabilitación de extremidad superior, con el objetivo de facilitar y acelerar la recuperación de la movilidad de los pacientes de ictus y así mejorar su calidad de vida.

Agradecimientos

Este trabajo has sido financiado por el Plan Nacional de I+D+i a través del proyecto "Interpretación de la intención y actuación humana mediante señales biomédicas y el análisis cinemático y dinámico del movimiento" (DPI2011-29660-C04-04).

Referencias

[1] U. Nations, World population prospects. The 2010 revision, 2011.

[2] Prange G, Jannink M, Groothuis-Oudshoorn C, Hermens H, IJzerman M, Systematic review of the effect of robotaided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke, J Rehab Res Develop 43(2):171?184, 2006.

[3] Schaechter JD, Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke, Prog Neurobiol 73:61?72, 2004.

[4] Edwards DF, Hahn M, Baum C, et al: The impact of mild stroke on meaningful activity and life satisfaction. J Stroke Cerebrovasc Dis 2006;15:151Y7

[5] Miller EL, Murray L, Richards L, Zorowitz RD, Bakas T, Clark P, Billinger SA, On behalf of the American Heart Association Council on Cardiovascular Nursing, and the Stroke Council, Comprehensive overview of nursing and interdisciplinary rehabilitation care of the stroke patient: A scienti¯c statement from the american heart association, Stroke 41(10):2402?2448, 2010.

[6] Stein J, Bishop L, Gillen G, et al (2011): A pilot study of robotic assisted exercise for hand weakness after stroke. Presented at ICORR; Zurich, Switzerland.

[7] Adamovich SV, Fluet GG, Mathai A, et al (2009): Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: A proof of concept study. J Neuroeng Rehabil; 17:6Y28

[8] Masia L, Krebs HI, Cappa P, et al (2007): Design and characterization of hand module for whole-arm rehabilitation following stroke. IEEE ASME Trans Mechatron; 12:399Y407

[9] Hesse S, Kuhlmann H, Wilk J, et al (2008): A new electromechanical trainer for sensorimotor rehabilitation of paralysed fingers: A case series in chronic and acute stroke patients. J Neuroeng Rehabil; 5:21

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[10] Koeneman EJ, Schultz RS, Wolf SL, et al (2004): A pneumatic muscle hand therapy device. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc;4:2711Y3

[11] Tong KY, Ho SK, Pang PK, Hu XL, Tam WK, Fung KL, Wei XJ, Chen PN, Chen M. (2010): An intention driven hand functions task training robotic system. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.;2010:3406-9.

[12] Brokaw EB, Black I, Holley RJ, Lum PS. (2011): Hand Spring Operated Movement Enhancer (HandSOME): a portable, passive hand exoskeleton for stroke rehabilitation. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.; 19(4):391-9.

[13] Badesa FJ, Llinares A, Morales R, Garcia-Aracil N, Sabater JM and Perez-Vidal C (2014): Pneumatic planar rehabilitation robot for post-stroke patients; 26(2):1450025-8

[14] Carey JR, Durfee WK, Bhatt E, et al: Comparison of finger tracking versus simple movement training via telerehabilitation to alter hand function and cortical reorganization after stroke. Neurorehabil Neural Repair 2007;21:216Y32

[15] Lum PS, Godfrey SB, Brokaw EB, Holley RJ and Nichols D: Robotic approachesfor rehabilitation of hand function after stroke. Am J Phys Med Rehabil 2012;91(Suppl):S242YS254.

[16] Běhálek L, Lenfeld P, Seidl M, Bobek J, Ausperger A. (2012): Friction properties of composites with natural fibres, sythetic and biodegradable polymer matrix.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ALGORITMO DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA BASADO EN UNA ARQUITECTURA DISTRIBUIDA

A. Soriano, M. Vallés, A. Valera, P. Albertos
email: {ansovi, mvalles, giuprog, pedro}ai2.upv.es
Instituto de Automática e Informática Industrial
Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Resumen

Este artículo propone una solución al problema de la navegación autónoma basada en una arquitectura distribuida donde cada fase del algoritmo está dividida en módulos independientes de software capaces de intercomunicarse entre sí para entre todos converger en una solución global efectiva. Para ello, se expone en primer lugar una revisión de las subtareas de las que depende directamente la problemática de la navegación autónoma, como son la localización del robot, la correcta detección del entorno que lo rodea, la generación de trayectorias libres de obstáculos, etc., y a continuación se describe el funcionamiento y la integración de dichas tareas dentro del algoritmo propuesto. Por último, se describe la aplicación del método sobre un entorno de simulación 3D y posteriormente se explican varias pruebas de navegación autónoma realizadas sobre un robot móvil Summit XL de configuración diferencial, con resultados satisfactorios.

Palabras clave: Navegación autónoma, arquitecturas distribuidas, algoritmos modulares, robótica móvil, simulación, arquitecturas de control, sensorización de robots.

1 INTRODUCCIÓN

Los avances en la tecnología informática, en las comunicaciones inalámbricas y en las tecnologías de sensorización están originando un interés notable en el campo emergente de la robótica y, en concreto, la mecatrónica. Hace unos años la producción y programación de robots se centraba en ofrecer un diseño robusto y cerrado donde el robot cumpliera con éxito la misión de realizar una tarea específica y controlada. En los últimos años, existe un alto interés desde la comunidad investigadora por extender el uso de la robótica a campos como la medicina ([12],[4]), la asistencia a personas ([3], [8]), las operaciones de rescate ([9]), misiones en entornos peligrosos o inaccesibles por humanos ([15]), etc. Estas tareas se realizan normalmente en entornos no controlados, difícilmente predecibles y que en ocasiones pueden requerir la cooperación entre sistemas robotizados para alcanzar sus objetivos. Estos retos han originado la aparición de nuevas arquitecturas o middlewares de control sobre robots que intentan ofrecer la flexibilidad y adaptabilidad necesaria para poder afrontar dichas situaciones.

Los middlewares de control de robots, también conocidos normalmente como "Robotics Software Frameworks" (RSFs), ofrecen un conjunto de herramientas genéricas, así como bibliotecas, controladores y metodologías o algoritmos, para facilitar la integración y el desarrollo software de robots. A diferencia de la tradicional tendencia hacia una programación secuencial donde paso a paso se van resolviendo las distintas fases que componen un objetivo, en los últimos años, este tipo de arquitecturas han evolucionado hacia una estructura cada vez más modular [16]. Los sistemas modulares son considerados sistemas distribuidos complejos formados por distintos módulos independientes que realizan distintas tareas como la integración entre el hardware y el software ([1]). Los sensores, actuadores y controladores del sistema se convierten en instrumentos individualizados controlados por estos módulos que cooperan juntos para alcanzar tareas específicas. La estructura de estos sistemas facilita su escalabilidad, reusabilidad, flexibilidad y además permite la capacidad de interacción con otros sistemas a través de redes de comunicación de una manera sencilla y transparente.

Por otro lado, la problemática de la navegación autónoma de vehículos es una de las áreas más estudiadas dentro del campo de la robótica móvil y que ha sido ampliamente estudiada en la literatura ([10], [11]). Aplicaciones como la vigilancia de recintos a modo de centinelas, la supervisión de instalaciones de acceso peligroso para humanos, la exploración de entornos hostiles o desconocidos, la búsqueda de objetos de interés en escenarios peligrosos, etc., requieren dar solución a este problema. La navegación autónoma engloba distintos subproblemas como son la localización correcta del vehículo dentro de un escenario, la detección del entorno que lo rodea, la planificación de la trayectoria desde donde se encuentra hasta el punto objetivo que desea alcanzar, la estrate-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

gia de seguimiento de trayectoria escogida para seguir el camino planificado, la evasión de los posibles obstáculos que se pueden interponer en su trayectoria, etc. En la literatura, existen multitud de aproximaciones y proposiciones para resolver dichos problemas, sin embargo, llevar a cabo su implementación en robots reales de la manera tradicional o funcional, requiere constantes traducciones de código según el tipo de lenguaje soportado por cada plataforma; además, de la constante modificación del código según las distintas opciones hardware o software disponibles.

El presente trabajo ofrece una solución al problema de la navegación autónoma de robots móviles desde un punto de vista modular basándose en el uso de una arquitectura distribuida. El documento se organiza de la siguiente manera. En la siguiente sección se presentan las diferentes problemáticas que componen una estrategia de navegación autónoma. A continuación se describe el middleware de control y el algoritmo modular desarrollado. En el cuarto apartado se define la plataforma robótica sobre la que se ha implementado el algoritmo de navegación así como las pruebas realizadas sobre la misma y, por último, las conclusiones.

2 NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE VEHÍCULOS

Se entiende por navegación autónoma a la capacidad de un robot para desplazarse a través de un escenario por sí solo. Históricamente la navegación es uno de los campos que más esfuerzos ha concentrado dentro de la comunidad investigadora en robótica y hoy en día es un área muy madurada. Para el caso concreto de la robótica móvil, la problemática del espacio de trabajo se reduce al plano 2D por inherencia del sistema, puesto que el robot sólo es capaz de moverse en el plano XY. La precisión de un algoritmo de navegación autónoma es directamente proporcional a la tasa de éxito en la resolución de las siguientes tareas:

Localización: Para que el robot se desplace de un lugar a otro es fundamental saber dónde se encuentra en cada momento. La localización es el proceso por el cual el robot obtiene su posición respecto a una referencia determinada. Es un tema muy estudiado en la literatura ([5], [7], [2], [13], [14]) y existen dos enfoques diferenciados: la localización global y la localización local. La principal diferencia reside únicamente en la referencia de posición sobre la que se localiza el robot. La localización global pretende situar al robot dentro de un espacio de coordenadas global normalmente definido por un mapa del escenario donde se ha especificado un punto de referencia fijo. En cambio la localización local utiliza como referencia la posición del propio robot, es decir, mide el desplazamiento relativo a una posición anterior conocida sin tener en cuenta el sistema de coordenadas del mundo. Las fuentes de información en las que se basan estas estrategias suelen partir de medidas u observaciones ofrecidas por sensores instalados en el propio robot como encoders en las ruedas, sensores de ultrasonidos, cámaras, sensores láser, etc. Para resolver esta problemática, existen muy diversas estrategias y metodologías según el número y el tipo de sensores incorporados en el robot.

Mapping o percepción del entorno: La metodología de percepción del entorno (conocida normalmente como Mapping) es también un aspecto crítico para la navegación ya que está ligada estrechamente a las tareas de localización y planificación. Normalmente la instrumentación más extendida para la percepción del entorno son sensores láser para el reconocimiento geométrico del entorno y cámaras para la detección de balizas u objetos de interés. Existen también multitud de metodologías que abordan esta tarea, en algunos casos se trabaja sobre un mapa global previo conocido y en otros se va construyendo poco a poco según el robot recorre el escenario.

Planificación de trayectorias: Esta tarea también es conocida como path planning y requiere en la mayoría de los casos, partir de un mapa conocido o al menos parcialmente conocido y preferiblemente estático. El problema a resolver es encontrar un camino factible desde un punto inicial del mapa a otro punto objetivo, evitando cualquier obstáculo que esté situado en el camino. Existen diversas estrategias para resolver este problema como las búsquedas basadas en mapas discretizados en cuadrículas (Grid-Based Search), búsquedas geométricas, algoritmos potenciales de atracción y repulsión, etc.

Estrategias de seguimiento de trayectorias: Una vez que se obtiene la trayectoria del camino que el robot debe seguir, es necesario realizar el control de su seguimiento, y es esa la problemática que abarca esta tarea. Partiendo de la posición actual donde se encuentra el robot, esta tarea debe calcular las acciones de control necesarias para hacer que el robot alcance la trayectoria planificada y la siga fielmente hasta alcanzar el objetivo. Es una tarea que depende prácticamente de todas las anteriormente descritas y que para obtener buenos resultados debe tener en cuenta parámetros como la configuración del robot con el que se trabaja, su cinemática, la fiabilidad de la localización, etc. Entre las estrategias más populares del control de seguimiento de trayectorias se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

encuentra la persecución pura y el punto descentralizado.

La combinación de las tareas descritas anteriormente puede variar según el tipo de algoritmo de navegación que se desee implementar o según los recursos de instrumentación o computación de los que disponga el robot. Como muestra el gráfico de la Figura 1, los algoritmos que combinan estrategias de localización y path planning, se agrupan con el término de *localización activa*, los algoritmos que utilizan únicamente el mapping o la detección del entorno para resolver tareas de path planning se denominan *algoritmos de exploración* y los algoritmos que se basan en la detección del entorno o mapping para localizarse se engloban en algoritmos de *SLAM* (Simultaneous Localization And Mapping). Por último también existe una clase de algoritmos denominados *SPLAM* (Simultaneous Planning Localization And Mapping) los cuales intentan combinan las estrategias de las tres áreas para navegar de manera autónoma.

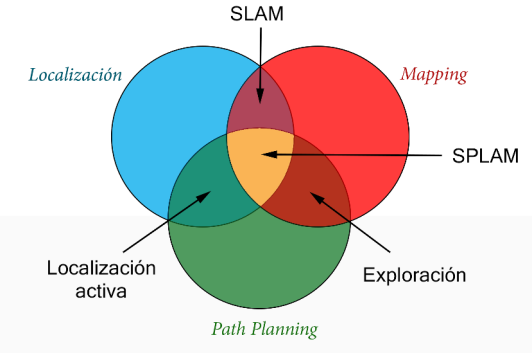


Figura 1: Relación entre las distintas tareas de navegación autónoma

El algoritmo que se presenta en este artículo tiene como objetivo ofrecer las tareas de las que depende la navegación autónoma de robots móviles a modo de módulos configurables, reutilizables, escalables e independientes que se comunican entre sí para llevar a cabo una tarea más compleja como es la navegación autónoma.

3 ALGORITMO DISTRIBUIDO DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

En este apartado se describe el middleware de control utilizado para la implementación del algoritmo así como la descripción del funcionamiento y la estructura del mismo.

3.1 MIDDLEWARE DE CONTROL/SOFTWARE UTILIZADO

Entre los middlewares de control o RSFs más extendidos, ROS (Robotic Operating System) destaca por estar basado en una arquitectura distribuida, completamente modular, y disponer de una comunidad de desarrolladores muy activa. Comparte algunas características de otros RSF como Player, YARP, Orocos, CARMEN, Orca, MOOS o Microsoft Robotics Studio. No obstante, ROS es un software de código totalmente abierto que ofrece a cualquier desarrollador la posibilidad de compartir sus aportaciones con la comunidad. De ese modo los investigadores no están reinventando la rueda constantemente, si no que pueden partir sus investigaciones desde algoritmos que ya han sido probados y verificados. ROS soporta la programación en C++, Python, Octave, LISP e incluso JAVA. Está desarrollado bajo licencia Creative Commons Attribution 3.0, lo que permite su libre uso, distribución y modificación de todo el código con la condición de que se especifique siempre a los desarrolladores originales.

Los principales componentes de ROS son:

Nodo ROS Master: Se trata del proceso principal de la arquitectura. Es quien permite que los nodos se encuentren entre sí e intercambien mensajes. Se podría decir que es la pizarra donde los nodos se registran y a la vez buscan lo que les hace falta.

Nodos: Un nodo es el mínimo proceso de cómputo de la arquitectura. Los nodos constituyen los principales componentes del Framework de ROS. Dado su diseño modular, el sistema de control de un robot suele estar compuesto por diversos nodos, donde cada uno lleva a cabo una función concreta. Estos nodos se pueden escribir tanto en C++ como en Python utilizando las librerías ofrecidas por ROS.

Topics: Los topics son el principal medio de comunicación entre nodos de ROS. Unos nodos pueden publicar mensajes mediante topics a una determinada frecuencia y otros nodos pueden suscribirse a dichos topics para recibirlos. De esa manera se establece una comunicación asíncrona de información entre nodos.

Servicios: Los servicios se encargan de las interacciones que no pueden resolverse mediante topics. También son publicados por nodos, sin embargo son síncronos y responden a una comunicación mediante eventos, es decir, de llamada y respuesta.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

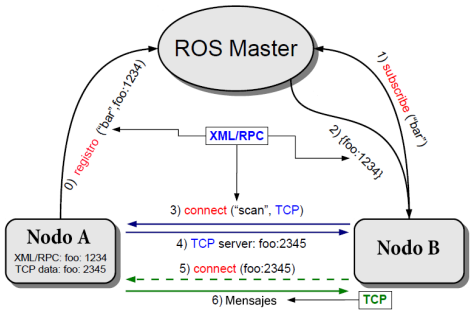


Figura 2: Funcionamiento del protocolo de comunicación de ROS

La figura 2 muestra un ejemplo de la estructura que tiene una arquitectura en ROS formada por un ROS master y dos nodos (*NodoA* y *NodoB*). Cuando el *NodoA* se inicia, se registra en el ROS Master y éste anota el nombre del topic que publica (denominado *bar* en el ejemplo), su ROS_HOSTNAME (*foo*) que lo identifica como si fuera una IP única y el puerto del nodo publicador (*1234* en este caso). En el siguiente paso (1 en la figura), el *NodoB* se inicia y se registra en el ROS Master, solicitando además una suscripción a un topic de nombre *bar* y el ROS Master le envía el ROS_HOSTNAME y el puerto del nodo que lo publica (paso 2). De esta manera el *NodoB* solicita una conexión de tipo TCP al *NodoA*, quien responde con el puerto de su servidor TCP (*2345*). Es entonces cuando el *NodoB* envía una solicitud de conexión al servidor TCP y el *NodoA* la acepta, creándose de ese modo el canal de comunicación directo entre los dos nodos. Como se puede observar el ROS Master gestiona tan sólo el vínculo de la comunicación pero después ya no interviene a menos que se realice una consulta distinta. Es por este motivo por el que una vez abierto el canal, si el ROS Master se cae, la comunicación entre los dos nodos continúa funcionando.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Se han definido una serie de módulos de software organizados concretamente en nodos del *stack* de navegación de ROS [6]. Cada módulo (Fig. 3) se ejecuta de forma independiente al resto, no obstante existe una serie de dependencias entre algunos módulos que les obliga a comunicarse entre ellos para poder ofrecer resultados. Un módulo viene definido por una serie de entradas y salidas. Las entradas se definen como suscripciones a topics que ofrecen la información necesaria para el buen funcionamiento del módulo y las salidas ofrecen la información resultante de la ejecución del módulo, por ejemplo mediante la publicación de topics o servicios.

Figura 3: Descripción general de la definición de un módulo software.

En el nivel más bajo del algoritmo, se encuentran los módulos que gestionan los dispositivos hardware disponibles en el robot y que no requieren ninguna información de entrada si no que se limitan a publicar las lecturas que ofrecen los dispositivos que gestionan. Para este trabajo es el caso de los nodos del láser Hokuyo y el giróscopo que incorpora el robot. Uno publica las medidas del láser por un topic llamado */scan* y otro las medidas del giro por */gyro*.
Un nivel por encima se encuentra el módulo de control (denominado *Controller*) el cual depende estrictamente de su suscripción al topic del giróscopo para la detección de la velocidad angular del robot. Mediante la lectura del topic del giro y a partir de la lectura de los sensores de efecto hall que tienen las ruedas, el nodo *Controller* ofrece una primera odometría básica publicada por un topic llamado */Odom*. Además es el módulo encargado de recibir las velocidades de referencia que deben alcanzar las ruedas, implementando para ello un controlador PD. Para ofrecer ese servicio, el nodo se suscribe a un topic llamado */cmd* por el cual deberán publicar aquellos nodos que deseen actuar sobre las ruedas.
Una vez obtenida la odometría, es posible integrar el nodo *Mapping* el cual implementa una estrategia basada en técnicas de SLAM. Este nodo se suscribe a los topics */scan* del nodo Hokuyo y */Odom* del *Controller* para publicar tanto el mapa que va construyendo (*/map*) como la posición global calculada dentro del mismo (*/Global_Odom*). Para el manejo del robot por el escenario, se puede lanzar el nodo *Mando* que gestiona la teleoperación del robot mediante un mando inalámbrico conectado vía Bluetooth, el cual publica las velocidades deseadas por el topic *cmd* recibido por el *Controller*. De este modo, la estructura de los módulos que componen este algoritmo de SLAM queda como se muestra gráficamente a continuación:

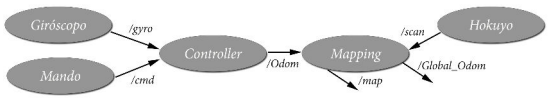


Figura 4: Interconexiones entre los módulos o nodos que forman el algoritmo de SLAM.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Mediante este algoritmo es posible por ejemplo, realizar un mapa del escenario por donde el robot va a navegar de manera autónoma posteriormente. En la figura 5 se muestra el mapa resultante de la navegación teleoperada del robot Summit XL por el departamento.

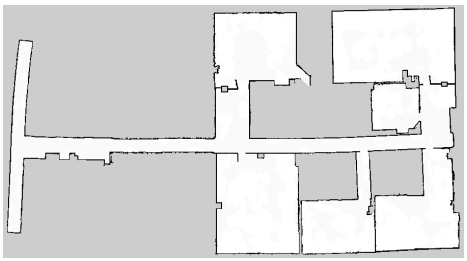


Figura 5: Mapa del departamento ai2 realizado con el algoritmo de SLAM.

Una vez conseguido el mapa estático global por donde el robot va a navegar, se lanza el nodo *Map_server* que ofrece dicho mapa mediante su publicación por un topic llamado */map*. Este mapa global permite por ejemplo hacer uso de algoritmos de localización activa como Montecarlo. El nodo de localización por Montecarlo recibe el nombre de *Amcl* y además de la suscripción al mapa global, tiene como entradas la suscripción al topic que ofrece la odometría (*/Odom*)y la suscripción al topic */scan* que ofrece las medidas del láser. El nodo *Amcl* implementa un filtro de partículas basado en Montecarlo ofreciendo como salida un vector con todas las posibles soluciones a la localización global del robot dentro del mapa (topic */particles*) y otra salida con una única posición global del robot por el topic (*/Amcl_Pose*), su mejor estimación. La figura 6 muestra la interacción de los distintos módulos que participan para conseguir llevar a cabo la localización.

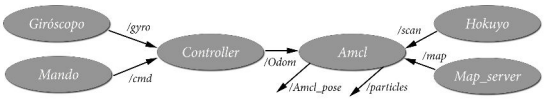


Figura 6: Nodos que forman parte del algoritmo de localización por Montecarlo.

Una vez obtenido el mapping del entorno y una buena estimación de la posición global, el siguiente paso es el desarrollo de un módulo de path planning que lea la posición local o global del robot y dada una posición destino calcule la trayectoria que debe seguir el robot para alcanzar el objetivo. Para ello, se implementan los módulos *Local_Planner* y *Global_Planner*, según si la navegación es en base a un destino con coordenadas globales o un destino relativo a la posición local del robot. Estos módulos dependen cada uno de su propio mapa de costes donde se especifican los posibles obstáculos que debe tener en cuenta el algoritmo para calcular la trayectoria. Estos mapas los generan los módulos *Local_Costmap* y *Global_Costmap*. Éste último se suscribe al topic */map* ofrecido por el módulo *Map_server* y al topic */scan* ofrecido por el nodo *Hokuyo* para de ese modo publicar un mapa estático de costes global por el topic */costmap_global*. A ese topic se suscribe el nodo *Global_Planner* para calcular una trayectoria global libre de obstáculos hasta un objetivo determinado dentro del mapa. Dicha trayectoria la publica por el topic */global_path*, al cual está suscrito el nodo *Local_Planner*. Como se ha comentado anteriormente, este nodo tiene también su propio mapa de costes ofrecido por el módulo *Local_Costmap*, que junto a las lecturas del láser y de la odometría (topics */scan* y *Odom*), planifica la trayectoria local necesaria para alcanzar la trayectoria global, teniendo en cuenta los obstáculos dinámicos que puedan ser detectados por el láser. El mismo planificador local es quien finalmente manda las acciones de control necesarias al nodo *Controller* para que el robot siga finalmente la trayectoria calculada. Hay que tener en cuenta que la frecuencia de ejecución del nodo local siempre debe ser mayor que la del nodo global, ya que si no la evasión de obstáculos dinámicos no funcionaría correctamente. También es necesario configurar ciertos parámetros de los planificadores como la distancia que se desea dejar como margen de seguridad respecto a los obstáculos o la fiabilidad con la que debe ceñirse el planificador local al global. La figura 7 muestra la arquitectura que describe el algoritmo de navegación autónoma implementado en el robot.

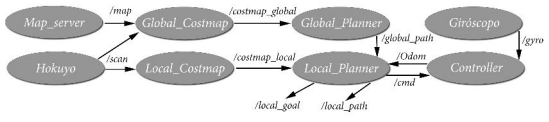


Figura 7: Comunicaciones entre los módulos del algoritmo de navegación autónoma.

Hay que tener en cuenta que gracias a la arquitectura modular, la navegación autónoma no requiere necesariamente una posición objetivo dentro del mapa global. Es posible enviar la referencia de la posición destino en relación a la odometría o a una posición local, lo que permite al robot navegar de manera autónoma pero sin tener en cuenta la información global de los módulos. De la misma manera es posible incorporar los algoritmos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de SLAM y localización de Montecarlo al algoritmo, obteniendo de esa manera tres estimaciones de posicionamiento distintas. El problema a la hora de implementarlo en el presente trabajo ha sido que la capacidad de cómputo del robot no es capaz de ejecutar todos los módulos en el tiempo correspondiente (los algoritmos de SLAM y Montecarlo requieren mucha carga computacional) y se generan retardos que en ocasiones hacen el sistema inestable.

4 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL ALGORITMO

El algoritmo de navegación autónoma se ha implementado en la plataforma robótica móvil Summit XL, a la cual se le ha incorporado un sensor láser para la detección del entorno. A continuación se describe el hardware utilizado, su adaptación al entorno de simulación V-REP y los resultados de las pruebas realizadas en entornos reales.

4.1 SUMMIT XL CON LÁSER HOKUYO

Figura 8: Robot móvil Summit XL con Hokuyo URG-04LX-UG01

El robot Summit XL (Fig. 8) ha sido desarrollado por la empresa Robotnik. Se trata de una plataforma móvil en configuración diferencial basada en cuatro motores brushless independientes. Tiene un peso aproximado de 30Kg, soporta una carga máxima de 20Kg adicionales, alcanza una velocidad máxima de 3m/s y tiene una autonomía de 180 minutos. Su cerebro se compone de una tarjeta mini ITX con un procesador Intel Atom CPU N2800 a 1.86GHz, una memoria DDR3 de 2GB y un disco duro de estado sólido de 128GB. Ofrece las conexiones típicas de una placa mini ITX como son puertos USB, Ethernet, salida VGA y HDMI e incorpora también un router configurado como punto de acceso para conectarse al robot vía WiFi. El sistema operativo que viene de fábrica es un Linux Ubuntu LTS. Además el robot viene configurado de fábrica para ser integrado completamente en ROS. Ofreciendo tanto los modelos urdf y xacro del mismo para sus simulaciones en Gazebo o rviz, como los controladores básicos de odometría y teleoperación.

Para la detección del entorno se ha integrado al robot, un láser 2D modelo Hokuyo URG-04LX-UG01. Este dispositivo se sitúa entre los range-finder láser más pequeños del mercado gracias a que pesa menos de 160 gramos y consume 2.5 vatios. Está específicamente diseñado para aplicaciones de interior y permite medir hasta 5.6 metros con un ángulo de visión de 240º, ofreciendo unas medidas fiables con una resolución aproximada de 0.352º. ROS ofrece un paquete para gestionar este modelo de láser con cualquier plataforma, lo cual facilita mucho su integración.

4.1.1 Simulación en V-REP

V-REP es un simulador 3D enfocado a la robótica que está basado en una arquitectura de control distribuida, donde cada objeto o modelo puede ser controlado mediante un script embebido (embedded script), un plug-in, un nodo de ROS o un cliente API remoto en lenguajes como C/C++, Java, Python, Lua, Matlab o Urbi. También permite la navegación por el escenario a través del uso del ratón, haciendo posible visualizar la escena desde cualquier sitio en cualquier momento de la simulación. Los modelos de los robots incluyen características intrínsecas como la definición de su cinemática, su peso, etc. V-REP incorpora algunos modelos de robots ya programados con métodos simulados de navegación o de evasión de colisiones.

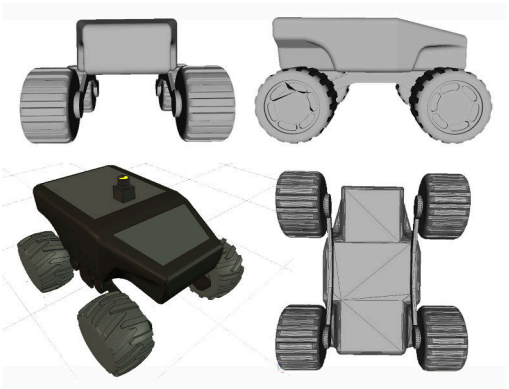


Figura 9: Planta, Alzado, Perfil y modelo 3D desarrollado del Summit XL con el láser.

Para la simulación del Summit XL en V-REP fue necesario en primer lugar llevar a cabo el modelado del robot en 3D (Fig. 9). Una vez se obtuvo el cuerpo y las ruedas, fue necesario definir y posicionar las juntas de revolución que dan movimiento en V-REP. Se ensambló al modelo una junta de revolución por cada rueda, se acoplaron las ruedas al cuerpo, se recubrió el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

modelo con primitivas invisibles para el calculo de colisiones, se definió la cinemática y el peso de los elementos y por último se agregó y se situó el láser Hokuyo al modelo, cuyo modelado venía incluido en la biblioteca de modelos de V-REP. La figura 10 muestra el modelado terminado en V-REP y en la siguiente dirección se puede ver un vídeo de la simulación: `http://wks.gii.upv.es/cobami/webfm_send/225`

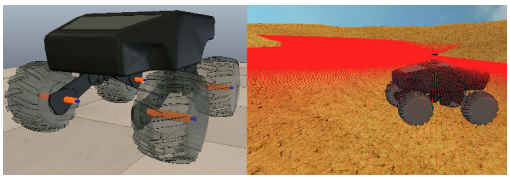


Figura 10: A la izquierda se muestra la integración de las juntas de revolución en cada rueda. A la derecha, el modelo 3D simulado en V-REP.

Una de las principales motivaciones para utilizar el simulador V-REP en este trabajo es la fácil integración con otros RSF, concretamente con ROS. La comunicación entre ambos sistemas se realiza mediante topics de ROS por los que se envían y reciben una serie de mensajes con unas características determinadas. Por ejemplo, en caso de querer simular en V-REP el resultado de algoritmos desarrollados en ROS para el robot real, el modelo del Summit en V-REP se suscribiría a las velocidades de las ruedas y las reproduciría tal y conforme lo haría cada rueda del robot real. Además, también es posible trabajar a la inversa, es decir, desarrollar un algoritmo en V-REP que sea quien dicte por un topic de ROS las acciones de control que el robot real debe aplicar a cada rueda.

4.1.2 Pruebas con el Summit XL

Para la validación del algoritmo de navegación, se ha llevado a cabo su implementación en el robot Summit XL. Después de diversas pruebas de navegación local y global en el laboratorio, se realizó una prueba final en un garaje interior de automóviles, con resultados satisfactorios. Para dicha prueba, primero se escaneó el garaje en cuestión con un sensor láser 3D FARO Focus3D como el que se muestra en la figura 11. En el siguiente enlace se puede ver un vídeo con el procedimiento de captura y la malla de puntos obtenida finalmente: `http://wks.gii.upv.es/cobami/webfm_send/226`

Debido a que el Summit XL únicamente lleva incorporado un escaner láser 2D, la nube de puntos obtenida del garaje fue reducida a un mapa

Figura 11: Escaner 3D FARO Focus 3D utilizado para el modelado del entorno del garaje.

2D cortando a la altura en la que se encuentra el láser. Los coches aparcados fueron eliminados del mapa puesto que se consideran obstáculos dinámicos que no deben tenerse en cuenta como mapa global estático.
Una vez obtenido el mapa global y situado el Summit en el garaje, hubo que calibrar correctamente su estimación de posición global dentro del mismo. Para ello se asignó una primera posición orientativa mediante el programa rviz y se utilizó el algoritmo de localización de Montecarlo para obtener una posición fiel a donde realmente se encontraba. Una vez bien localizado dentro del mapa global, se seleccionaron varias posiciones destino que el robot tuvo que ir alcanzando evitando las colisiones con los pilares y con los coches aparcados que habían en ese momento.

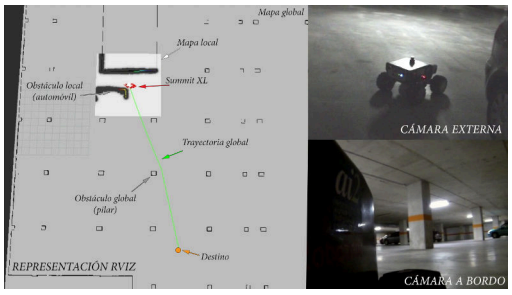


Figura 12: Captura de la ejecución del algoritmo de navegación autónoma.

La figura 12 muestra un instante de la ejecución del algoritmo. Está dividida en tres imágenes, la imagen de la izquierda se corresponde con la representación en la interfaz de *rviz* donde se muestra el mapa global del garaje con paredes y pilares sobre el que está representada la posición del robot, la zona de detección del mapa local de costes y la trayectoria global que debe seguir para alcanzar el punto objetivo. Las imágenes de la derecha se corresponden a dos cámaras, una a bordo del Summit (imagen inferior) y otra externa (superior), las cuales no intervienen para nada en el desarrollo del algoritmo, tal sólo se usaron para registrar su correcto funcionamiento. La demostración completa del experimento está disponible en el siguiente enlace: `http://wks.gii.upv.es/cobami/webfm_send/157`

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5 CONCLUSIONES

Este artículo presenta una solución al problema de la navegación autónoma aplicada concretamente para robots móviles, basada en una arquitectura distribuida. Las distintas tareas que componen el algoritmo de navegación han sido individualizadas en formato de módulos software dotados de cierta capacidad de comunicación entre ellos, dotando al sistema de gran flexibilidad, escalabilidad y reusabilidad.

Se ha expuesto el desarrollo y la estructura de la arquitectura basada en el framework de programación de robots ROS, describiendo las soluciones a los distintos problemas que engloba la navegación autónoma.

Por último, se ha integrado el robot móvil Summit XL en el software de visualización 3D V-REP para llevar a cabo pruebas de simulación y verificación de comportamientos. Además, una vez corroborado el correcto funcionamiento del algoritmo en simulación, se ha implementado en la plataforma real Summit XL realizando varias pruebas en entornos interiores y obteniendo resultados satisfactorios.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad España por la financiación parcial de este trabajo bajo los proyectos de investigación DPI2011-28507-C02-01 y DPI2013-44227-R.

Referencias

[1] B. Basso, B. Kehoe, and J. K. Hedrick. A multi-level modularized system architecture for mobile robotics. *ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference*, 2010.

[2] P. Chand and D. A. Carnegie. Mapping and exploration in a hierarchical heterogeneous multi-robot system using limited capability robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 61:565–579, 2013.

[3] T. Körtner, A. Schmid, and D. Batko-Klein. *How Social Robots Make Older Users Really Feel Well – A Method to Assess Users' Concepts of a Social Robotic Assistant*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[4] Lo, C. Albert, and Guarino. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *New England Journal of Medicine*, 362(19):1772–1783, 2010.

[5] I. Loevsky and I. Shimshoni. Reliable and efficient landmark-based localization for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 58:520–528, 2010.

[6] E. Marder–Eppstein. Ros navigation stack. http://wiki.ros.org/navigation, 2011.

[7] M. Mirkhani and R. Forsati. A novel efficient algorithm for mobile robot localization. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013.

[8] T. Mukai and Hirano. Development of a nursing-care assistant robot riba that can lift a human in its arms. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5996–6001, Oct 2010.

[9] K. Nagatani and Kiribayashi. Redesign of rescue mobile robot quince. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 13–18, Nov 2011.

[10] D. Nakhaeinia and S. H. Tang. A review of control architectures for autonomous navigation of mobile robots. *International Journal of Physical Sciences*, pages 169–174, 2011.

[11] D. Sales, O. F., and D. Wolf. Topological autonomous navigation for mobile robots in indoor environments using ann and fsm. In *Proceedings of the I Brazilian Conference on Critical Embedded Systems (CBSEC), São Carlos, Brazil*, 2011.

[12] T. Shibata. Therapeutic seal robot as biofeedback medical device: Qualitative and quantitative evaluations of robot therapy in dementia care. *Proceedings of the IEEE*, 100(8):2527–2538, Aug 2012.

[13] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza. Introduction to autonomous mobile robots. *The MIT Press*, 2004.

[14] I. Skog and P. Handel. In-car positioning and navigation technologies - a survey. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions.*, 10:4–21, 2009.

[15] D. Toit, N.E., and J. Burdick. Robot motion planning in dynamic, uncertain environments. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28(1):101–115, Feb 2012.

[16] M. von Essen and J. Hirvonen. Robotic software frameworks and software component models in the development of automated handling of individual natural fibers. *J Micro-Bio Robot*, 2014.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MODOS ASUMIDOS Y ELEMENTOS FINITOS: COMPARATIVA DE MODELOS PARA ROBOTS FLEXIBLES

Pablo Bengoa pablo.bengoa@ehu.es
Asier Zubizarreta asier.zubizarreta@ehu.es
Aitziber Mancisidor amancisidor007@ehu.es
Itziar Cabanes itziar.cabanes@ehu.es
Eva Portillo eva.portillo@ehu.es
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao

Resumen

El objetivo de este artículo es comparar dos modelos de representación de la flexibilidad de los eslabones de un robot manipulador, el modelo en modos asumidos y el modelo en elementos finitos. En el se presentan una metodología sistemática basada en la formulación Lagrangiana para desarrollar ambos modelos y posteriormente se comparan las características de cada uno de los métodos en detalle.

Palabras clave: Manipuladores flexibles, método de modos asumidos, AMM, método de elementos finitos, FEM, modelo dinámico.

1. INTRODUCCIÓN

Los manipuladores flexibles ofrecen varias ventajas sobre sus homólogos rígidos. Entre ellas destacan una respuesta del sistema más rápida, un menor consumo energético, actuadores relativamente menores y menor masa del sistema completo. En definitiva, hacen que el coste del sistema completo se reduzca, [28]. Sin embargo, debido a la naturaleza no lineal y altamente acoplada de las ecuaciones que gobiernan la dinámica de este tipo de sistemas, el control de manipuladores flexibles presenta mayor complejidad, [1, 4].

Debido a las ventajas de los manipuladores flexibles, esta tecnología tiene aplicaciones en campos muy diversos. Por citar algunas, estos robots se están utilizando en la investigación de robótica dirigida a la rehabilitación medica asistencial [12], en aplicaciones de microcirugía [19], en la descontaminación de residuos nucleares [18], aplicaciones espaciales [9], maquinas bípedas [13] o en la industria para aplicaciones *pick and place* de gran precisión [25]. Estos trabajos muestran que el estudio del comportamiento dinámico y el control de robots flexibles se ha convertido en una línea de investigación atractiva para muchos investigadores debido a su potencialidad.

Las investigaciones realizadas sobre los manipuladores flexibles abarcan desde manipuladores de un solo elemento rotando alrededor de un eje fijo [15] hasta brazos con múltiples eslabones que trabajan en el espacio tridimensional [22]. Sin embargo, en la literatura los trabajos experimentales se limitan, en gran medida, a manipuladores de un solo elemento. Esto es debido a la complejidad que supone los sistemas de múltiples eslabones, debido al incremento de los grados de libertad y de las interrelaciones entre el movimiento y sus deformaciones [28].

Desde el punto de vista del control, es importante reconocer la naturaleza flexible del sistema y construir un modelo matemático fiel de la respuesta dinámica de éste. Los errores introducidos debidos a no considerar la flexibilidad de los manipuladores afectan, principalmente al requerimiento de par de los motores y la inexactitud del posicionamiento de la pinza del sistema, [10].

A la hora de calcular el modelo de un sistema flexible, se pueden realizar dos hipótesis principales: definir el sistema como un *modelo continuo* o como un *modelo de parámetros discretos*. Por un lado, los modelos continuos están representados por variables distribuidas y son aquellos en los que es necesario considerar la distribución espacial de sus parámetros. Estos modelos representan sistemas de infinitos-grados de libertad por lo que suelen ser muy precisos a la vez que complejos. Las ecuaciones de movimiento obtenidas a partir de los sistemas continuos están descritas por ecuaciones en derivadas parciales (PDE), debido a que su respuesta esta definida mediante una o más variables espaciales y una variable temporal. A la hora de obtener la respuesta del sistema, los sistemas continuos requieren una adecuada definición de las condiciones de contorno. Pese a que dichos sistemas están definidos por un número infinito de frecuencias naturales, para la simulación y definición de controladores se utilizan métodos de aproximaciones, siendo el método de modos asumidos [20] el más utilizado.

Por el contrario, cuando se trata de modelar matemáticamente fenómenos o sistemas reales con frecuencia se utilizan entidades ideales: masa puntual, carga concentrada en un punto del espacio etc... es decir, se considera que los valores que determinan las características físicas de los objetos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

se encuentran concentrados en un punto. Estos sistemas se denominan sistemas de parámetros discretos y se modelan mediante un número finito de grados de libertad. Los modelos definidos mediante parámetros discretos dividen cada eslabón en tantos elementos como grados de libertad disponen. Dentro de esta hipótesis existen dos métodos principales: el método de parámetros concentrados y el método de elementos finitos. Pese a que el método de parámetros concentrados es una propuesta sencilla, los resultados obtenidos mediante su aplicación demuestran que el método no es lo suficientemente preciso para manejar las no-linealidades y la complejidad de la dinámica de los manipuladores flexibles [11][16][17]. Estos sistemas, al contrario que los modelos continuos, se definen mediante ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs), las cuales son únicamente dependientes del tiempo. Dicha respuesta esta representada por un número finito de frecuencias naturales (el mismo número de frecuencias que de grados de libertad) y no requieren de condiciones de contorno para la resolución.

Con intención de valorar estos aspectos y pretendiendo ampliar en un futuro la metodología desarrollada para el modelado de robots paralelos de alta capacidad dinamica [31], este artículo presenta una comparativa entre los dos métodos de modelado más utilizados para el modelado flexible, el método de modos asumidos (AMM) y el método de elementos finitos (FEM). Para ello, en las secciones 2, 3, 4, 5 y 6 se detalla el modelado de manipuladores flexibles de n eslabones, destacando las secciones 4 y 5 donde se detalla la metodología para el modelado del AMM y FEM, respectivamente. En la sección 7 se hace una comparación de ambos métodos tomando como ejemplo un manipulador de un eslabón. Finalmente, se resumen las ideas más importantes.

2. CINEMÁTICA

Considérese un brazo planar flexible de n eslabones y sujeto a deformaciones de pandeo en el plano del movimiento. Se establecen los siguientes sistemas de referencia: sistema de referencia inercial $(\widehat{X}_0, \widehat{Y}_0)$, el sistema de referencia móvil asociado al eslabón rígido (X_i, Y_i) y el sistema de referencia móvil asociado al eslabón flexible $(\widehat{X}_i, \widehat{Y}_i)$. El movimiento rígido esta descrito por el ángulo θ_i de la articulación i, mientras que $y_i(x)$ denota la deformación del eslabón a lo largo de $x_i, 0 \leq x_i \leq l_i$, donde l_i es la longitud del eslabón i (Figura 1).

Se define ${}^i p_i(x) = (x_i, y_i(x_i))^T$ como la posición de un punto a lo largo de la deformación del eslabón con respecto al sistema de referencia (X_i, Y_i) y p_i es la posición absoluta del mismo punto respecto

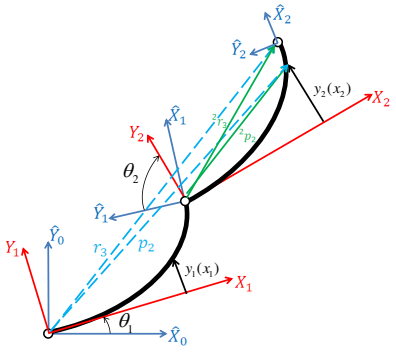


Figura 1: Sistemas de referencia para un manipulador flexible de dos eslabones.

al sistema de referencia $(\widehat{X}_0, \widehat{Y}_0)$. De igual modo, ${}^i r_{i+1} = {}^i\ p_i(l)$ indica la posición del extremo del eslabón más lejano a la base del brazo con respecto a (X_i, Y_i), y r_i la posición absoluta en el sistema de referencia $(\widehat{X}_0, \widehat{Y}_0)$.

La matriz de rotación del eje (rígida), $\mathbf{A}_i$, y la matriz de rotación flexible del eslabón en el extremo, $\mathbf{E}_i$, son respectivamente:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i \end{bmatrix}, \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 1 & -y'_{ie} \\ y'_{ie} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $y'_{ie} = (\partial y_i / \partial x_i)|_{x_i = l_i}$ después de realizar la aproximación $\arctan(y'_{ie}) \approx y'_{ie}$, valida para pequeños ángulos. Debido a esta aproximación, los términos de segundo orden de la deformación son despreciados. Por lo tanto, la posición absoluta de los vectores puede ser expresada como:

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{W}_i\, {}^i\mathbf{p}_i, \quad \mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{W}_i\, {}^i\mathbf{r}_{i+1} \quad (2)$$

donde $\mathbf{W}_i$ es la matriz de transformación global desde $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0)$ hasta (X_i, Y_i), la cual responde a la ecuación recursiva:

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_{i-1}\mathbf{E}_{i-1}\mathbf{A}_i = \widehat{\mathbf{W}}_{i-1}\mathbf{A}_i, \quad \widehat{\mathbf{W}}_0 = \mathbf{I} \quad (3)$$

Partiendo de las relaciones anteriores, la cinemática de cualquier punto a lo largo del brazo robótico queda completamente caracterizado.

Para el análisis de la energía cinemática que se realizará posteriormente, es necesario derivar la posición respecto del tiempo. En particular, la velocidad angular (módulo) absoluta del sistema de referencia (X_i, Y_i) es

$$\dot{\alpha}_i = \sum_{j=1}^{i} \dot{\theta}_j + \sum_{k=1}^{i-1} \dot{y}'_{ke} \quad (4)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

donde el punto superior denota la derivada respecto del tiempo.

3. MODELO LAGRANGIANO

Las ecuaciones de movimiento de un brazo planar flexible de n eslabones se pueden obtener a partir de la ecuación de Lagrange. En ella se calcula la energía cinética T y la energía potencial U del sistema formando la Lagrangiana $L = T - U$.

La energía cinética total esta compuesta por la suma de las siguientes contribuciones:

$$T = \sum_{i=1}^{n} T_{h_i} + \sum_{i=1}^{n} T_{l_i} + T_p \tag{5}$$

donde T_{h_i} es la energía cinética del solido rígido localizado en el eje i, de masa m_{h_i} y de inercia J_{h_i},

$$T_{h_i} = \frac{1}{2}\, m_{h_i}\, \dot{\mathbf{r}}_i^T\, \dot{\mathbf{r}}_i + \frac{1}{2}\, J_{h_i}\, \dot{\alpha}_i^2 \tag{6}$$

T_{l_i} es la energía cinética asociada al solido flexible i y con densidad lineal ρ_i,

$$T_{l_i} = \frac{1}{2} \int_0^{l_i} \rho_i(x_i)\, \dot{\mathbf{p}}_i^T(x_i) \dot{\mathbf{p}}_i(x_i) dx_i \tag{7}$$

y T_p la energía cinética asociada a la carga de masa m_p y momento de inercia J_p localizada en el extremo del eslabón,

$$T_p = \frac{1}{2} m_p\, \dot{\mathbf{r}}_{n+1}^T \dot{\mathbf{r}}_{n+1} + \frac{1}{2} J_p (\dot{\alpha}_n + \dot{y}'_{ne})^2 \tag{8}$$

Por otro lado, en ausencia de gravedad (movimiento en el plano horizontal) la energía potencial se define como :

$$U = \sum_{i=1}^{n} U_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \int_0^{l_i} (EI)_i(x_i) \left[\frac{d^2 y_i(x_i)}{dx_i^2} \right]^2 dx_i \tag{9}$$

donde U_i es la energía elástica almacenada en el eslabón i, siendo $(EI)_i$ su rigidez flexural [27].

Las expresiones Lagrangianas enunciadas anteriormente son funcionales, debido a la intrínseca naturaleza distribuida de los sistemas dinámicos, debido a que no se ha realizado ninguna discretización de las expresiones de flexibilidad estructural del eslabón. Esta Lagrangiana *exacta* puede ser utilizada para definir el modelo infinito-dimensional, el cual es muy poco útil a la hora de simular o definir controladores. Por lo tanto, a continuación se introducirán dos representaciones finito-dimensionales: el método de modos asumidos y el método de elementos finitos.

4. MÉTODO DE MODOS ASUMIDOS

En el método de modos asumidos los eslabones están modelados como vigas Euler-Bernoulli [27] de densidad ρ_i y rigidez flexural $(EI)_i$ constantes, cuya deformación $y_i(x_i, t)$ satisface la ecuación diferencial

$$(EI)_i \frac{\partial^4 y_i(x_i,t)}{\partial x_i^4} + \rho_i \frac{\partial^2 y_i(x_i,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{10}$$

Para poder resolver esta ecuación, es necesario imponer las condiciones de contorno de la base y el extremo de cada eslabón. Es razonable suponer que la inercia de un eslabón ligero es pequeña en comparación con la inercia del eje, por lo tanto, se pueden utilizar funciones modales restringidas [2]. Concretamente, se asume que el eslabón esta anclado en la base, por lo que las condiciones de contorno en ese extremo son:

$$y_i(0,t) = 0, \quad y'_i(0,t) = 0 \tag{11}$$

En lo que a las condiciones de contorno del otro extremo se refiere, existen numerosas publicaciones donde se asume que el extremo esta libre, debido a la dificultad de cuantificar las masas e inercias variables en el tiempo y/o desconocidas. Sin embargo, en [23] se afirma que es más exacto considerar una masa el extremo a la hora de definir las condiciones de contorno para representar el balance de momento y la fuerza de cizallamiento. Por lo que las condiciones de contorno de dicho extremo se definen como:

$$\begin{aligned}
(EI)_i \left.\frac{\partial^2 y_i(x_i,t)}{\partial x_i^2}\right|_{x_i=l_i} &= -\left(J_{l_i} + J_{MD_i}\right) \frac{d^2}{dt^2} \left(\left.\frac{\partial y_i(x_i,t)}{\partial x_i}\right|_{x_i=l_i} \right) \\
&\quad - (MD)_i \frac{d^2}{dt^2} \left(y_i(x_i,t)|_{x_i=l_i} \right), \\
(EI)_i \left.\frac{\partial^3 y_i(x_i,t)}{\partial x_i^3}\right|_{x_i=l_i} &= M_{l_i} \frac{d^2}{dt^2} \left(y_i(x_i,t)|_{x_i=l_i} \right) \\
&\quad + (MD)_i \frac{d^2}{dt^2} \left(\left.\frac{\partial y_i(x_i,t)}{\partial x_i}\right|_{x_i=l_i} \right)
\end{aligned} \tag{12}$$

donde M_{l_i} y J_{l_i} son la masa e inercia en el extremo del eslabón i, respectivamente. Por otro lado, $(MD)_i$ y J_{MD_i} es la contribución de las masas e inercias situadas a lo largo del eslabón i. Sin embargo, esta contribución no suele ser incluida en el análisis de las funciones modales debido a su complejidad.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Analizando independientemente la solución temporal y espacial de la ecuación (10), la flexión del eslabón puede ser expresada como:

$$y_i(x_i,t) = \sum_{j=1}^{n_i} \phi_{ij}(x_i)\delta_{ij}(t) \tag{13}$$

donde $\delta_{ij}(t)$ son las variables temporales asociadas a las funciones modales $\phi_{ij}(x_i)$ del link i. Por lo tanto, cada termino de la solución general (10) es el producto de la función temporal armónica

$$\delta_{ij}(t) = e^{(j\omega_{ij}t)} \tag{14}$$

y el vector característico espacial

$$\begin{aligned}\phi_{ij}(x_i) = {} & C_{1,ij}cosh(\beta_{ij}x_i) + C_{2,ij}sinh(\beta_{ij}x_i) \\ & + C_{3,ij}cos(\beta_{ij}x_i) + C_{4,ij}sin(\beta_{ij}x_i)\end{aligned} \tag{15}$$

donde en (14) ω_{ij} es la frecuencia natural j del problema de valores propios del eslabón i, y en (15), $\beta_{ij}^4 = \omega_{ij}^2\rho_i/(EI)_i$ [7].

Aplicando las condiciones de contorno enunciadas anteriormente se obtienen los coeficientes constantes de (15). Mediante la condición de contorno que describe la suposición de que el eslabón esta anclado, ecuación (11), se deduce que:

$$C_{3,ij} = -C_{1,ij}, \quad C_{4,ij} = -C_{2,ij} \tag{16}$$

mientras que la condición de contorno del otro extremo del eslabón, (12), lleva a que la relación $C_{3,ij}/C_{1,ij}$ es

$$\begin{aligned}\frac{C_{3,ij}}{C_{1,ij}} &= \frac{C_{num}}{C_{den}} \\ C_{num} &= cosh(\beta_{ij}L_i) + cos(\beta_{ij}L_i) \\ &\quad - \frac{J_{MD_i} + J_{l_i}}{\rho(x_i)}\beta_{ij}^3(sinh(\beta_{ij}L_i) + sin(\beta_{ij}L_i)) \\ &\quad - \frac{(MD)_i}{\rho(x_i)}\beta_{ij}^2(cosh(\beta_{ij}L_i) - cos(\beta_{ij}L_i)) \\ C_{den} &= sinh(\beta_{ij}L_i) + sin(\beta_{ij}L_i) \\ &\quad - \frac{J_{MD_i} + J_{l_i}}{\rho(x_i)}\beta_{ij}^3(cosh(\beta_{ij}L_i) - cos(\beta_{ij}L_i)) \\ &\quad - \frac{(MD)_i}{\rho(x_i)}\beta_{ij}^2(sinh(\beta_{ij}L_i) - sin(\beta_{ij}L_i))\end{aligned} \tag{17}$$

donde β_{ij} es la solución j del eslabón i a la función de valores propios (18)

$$\begin{aligned}&\left[\frac{M_{l_i}K\beta_{ij}}{\rho(x_i)} - \left(\frac{MD_i\beta_{ij}^2}{\rho(x_i)}\right)^2 - 1\right] cosh(\beta_{ij}L_i)cos(\beta_{ij}L_i) \\ &+ \left[K + \frac{M_{l_i}\beta_{ij}}{\rho(x_i)}\right] cosh(\beta_{ij}L_i)sin(\beta_{ij}L_i) \\ &+ \left[K - \frac{M_{l_i}\beta_{ij}}{\rho(x_i)}\right] sinh(\beta_{ij}L_i)cos(\beta_{ij}L_i) \\ &+ 2\frac{MD_i\beta_{ij}^2}{\rho(x_i)}sinh(\beta_{ij}L_i)sin(\beta_{ij}L_i) + \left(\frac{MD_i\beta_{ij}^2}{\rho(x_i)}\right)^2 \\ &- \frac{M_{l_i}(J_{MD_i} + J_{l_i})\beta_{ij}^4}{\rho(x_i)^2} - 1 = 0\end{aligned} \tag{18}$$

donde $K = (J_{MD_i} + J_{l_i})\beta_{ij}^3/\rho(x_i)$ y los valores de $C_{1,ij}$ y $C_{3,ij}$ son factores de escala que se determinan mediante la normalización definida como:

$$\int_0^{l_i} \phi_i(x_i)\rho_i\phi_i(x_i) = 1 \tag{19}$$

de manera que satisfaga la condición de ortogonalidad.

Ha de tenerse en cuenta, que para el caso de un solo eslabón, M_{l_1} y J_{l_1} son directamente la masa y la inercia de la carga situada en el extremo, mientras que los términos J_{MD}, $(MD)_i$ y m_{MD} son nulos. En el caso genérico de que el número de eslabones sea mayor que uno ($n > 1$), entonces estos términos no son nulos sino que serán dependientes de todas las masas existentes en ese eslabón además de sus sucesivos y la posición de estos. Por lo tanto, el calculo exacto de la función de modos es función de la configuración instantánea del robot. Esto aumenta la carga computacional de la ejecución on-line y por consiguiente la complejidad en la implementación del modelo.

5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos implica descomponer una estructura en diferentes elementos simples. Se asume que dichos elementos están interconectados en ciertos puntos denominados nodos. Para cada elemento, se describe su comportamiento mediante un ecuación obtenida a partir de técnicas de aproximación. Posteriormente, las ecuaciones son ensambladas de forma que formen la ecuación del sistema. Es sabido que reduciendo el tamaño de cada elemento, es decir incrementando el número de elementos, la solución general de la ecuación del sistema tiende a converger a la solución exacta.

Del mismo modo que en el método de modos asumidos, la teoría de Euler-Bernoulli es utilizada a la hora de modelar el comportamiento elástico del manipulador. Por otro lado, se considera que ca-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

da eslabón tiene una sección constante y que las propiedades del material del cual está compuesto permanecen uniformes a lo largo de este.

Utilizando el método de elementos finitos estándar para la resolución de problemas, se define el desplazamiento $y_{ij}(x_i,t)$ como:

$$y_{ij}(x_i,t) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{N}_{ij}^{e}(x)\,\mathbf{Q}_{ij}^{e}(t) \qquad (20)$$

donde $\mathbf{N}_{ij}^{e}(x)$ y $\mathbf{Q}_{ij}^{e}(t)$ representan la función de modo y el desplazamiento modal, respectivamente. El manipulador se modela aproximándolo a una concatenación de i eslabones de k_i elementos. Debido a que se ha utilizado la teoría de Euler-Bernoulli (10), cada nodo esta definido por dos grados de libertad, un desplazamiento trasversal y una rotación. Por lo tanto, se requiere el uso de las funciones cubicas básicas de Hermite como funciones de modo de cada elemento [30]. Por consiguiente, para elementos de longitud l_{ij} la función de modo que se obtiene es:

$$\mathbf{N}_{ij}^{e}(x) = \begin{bmatrix} N_{1_{ij}}(x) & N_{2_{ij}}(x) & N_{3_{ij}}(x) & N_{4_{ij}}(x) \end{bmatrix} \quad (21)$$

donde,

$$\begin{aligned} N_{1_{ij}}(x_r) &= 1 - \tfrac{3x_r^2}{l_e^2} + \tfrac{2x_r^3}{l_e^3} & N_{2_{ij}}(x_r) &= x_r - \tfrac{2x_r^2}{l_e} + \tfrac{x_r^3}{l_e^2} \\ N_{3_{ij}}(x_r) &= \tfrac{3x_r^2}{l_e^2} + \tfrac{2x_r^3}{l_e^3} & N_{4_{ij}}(x_r) &= -\tfrac{x_r^2}{l_e} + \tfrac{x_r^3}{l_e^2} \end{aligned} \qquad (22)$$

donde x_r es la posición relativa al origen del elemento j del eslabón i.

Para el elemento *i,j*, el vector de desplazamiento modal esta definido por:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{e} &= \begin{bmatrix} \mathbf{q}_r & \mathbf{q}_f \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{q}_r &= \sum_{a=1}^{i} q_{r_i} \\ \mathbf{q}_f &= u_{i,j-1}(t) \quad v_{i,j-1}(t) \quad u_{i,j}(t) \quad v_{i,j}(t) \end{aligned} \qquad (23)$$

donde q_{r_i} es la variable activa, $u_{i,j-1}(t)$ y $u_{i,j}(t)$ son los desplazamientos elásticos y $v_{i,j-1}(t)$ y $v_{i,j}(t)$ sus correspondientes rotaciones del elemento j del eslabón i.

6. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO DINÁMICA

La ecuación de movimiento dinámica se obtiene mediante la formulación Lagrangiana de la dinámica. Cabe destacar que el vector generalizado de fuerza τ corresponde a las variables activas q_{r_i} (siendo estos los pares de giro para las articulaciones rotativas y fuerzas para las prismáticas) mientras que para las variables de deformación q_{f_i}, la variable generalizada de fuerza es cero, siempre y cuando no haya desplazamiento elástico en la posición donde se aplica las fuerzas externas (condición establecida a la hora de modelar los eslabones con un extremo anclado [5]).

La ecuación Lagrangiana general para las variables activas está descrita (en el caso del eslabón con extremo anclado) por:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{r_i}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_{r_i}} + \frac{\partial U}{\partial q_{r_i}} = \tau_i \qquad (24)$$

y para las variables de deformación flexible q_{f_i}

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{f_i}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_{f_i}} + \frac{\partial U}{\partial q_{f_i}} = 0 \qquad (25)$$

Ha sido demostrado [8] que las ecuaciones simbólicas en forma cerrada es la forma más eficiente de implementar algoritmos de control en tiempo real para los sistemas dinámicos de los manipuladores . Dichas ecuaciones de movimiento se obtienen mediante el uso de software simbólico a partir de las ecuaciones Lagrangianas definidas en (24) y (25) [8][6], cumpliendo la expresión:

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & M_{rf} \\ Mrf^T & M_{ff} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}^e + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \mathbf{U}^e = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (26)$$

donde $\mathbf{U}^e = \delta$ para el caso de AMM y $\mathbf{U}^e = Q$ para FEM y el punto representa la derivada respecto al tiempo; M_{rr}, M_{rf} y M_{ff} son la componente rígida, el termino acoplado y la componente flexible de la matriz de inercias, respectivamente, y K la matriz de rigidez.

7. COMPARATIVA EN ESLABÓN DE 1 GDL

Aplicando ambos métodos en simulación, Modos Asumidos y Elementos Finitos, se ha modelado un manipulador de un solo eslabón anclado a un eje rotatorio en uno de sus extremos y con una masa en el otro. Para poder comparar los resultados, se ha reproducido el manipulador de un eslabón denominado Sheffield, un manipulador flexible construido por la universidad de Sheffield (Gran Bretaña). Dicho manipulador y el manipulador de dos eslabones IST (Universidad Técnica de Lisboa, Portugal) son a día de hoy los principales prototipos de ensayo en la literatura existente [29]. Dicho manipulador tiene las características descritas en el cuadro 1:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 1: Tabla de parámetros del manipulador Sheffield (unidades en SI).

Parámetros Físicos	**Valor**
Rigidez Flexural	$71 \cdot 10^{9}$
Inercia de la sección trasversal	$5{,}253 \cdot 10^{-11}$
Inercia del eje	$5{,}8598 \cdot 10^{-4}$
Densidad de masa por área	2710
Área de la sección transversal	$6{,}08 \cdot 10^{-5}$
Longitud	0,9
Masa de la carga	0,020

Para ambas simulaciones se ha utilizado como par de excitación una señal *bang-bang* de $\pm 0{,}3Nm$ (véase Figura 2) como par de entrada aplicada al eje rotatorio que le permite al manipulador acelerar inicialmente, desacelerar y finalmente pararse en una posición dada.

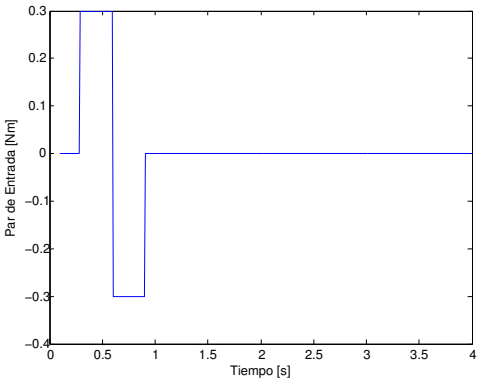


Figura 2: Par de entrada aplicado al eje.

En cuanto al número de modos (o elementos) a utilizar para la discretización del modelo, varios autores [14] sugirieron que sólo son necesarios los primeros. Dicha justificación viene determinada por el hecho que cuanto mayor es la frecuencia natural del modo, menor es su amplitud y por lo tanto menos significativa su aportación a la respuesta total. Por otro lado, también se debe de tener en cuenta el ancho de banda de los sensores/actuadores, ya que éste es limitado. Por lo tanto, para manipuladores modelados mediante AMM, [3] justifica que es suficiente con los primeros dos o tres modos. Por otro lado, [24] afirma que se pueden obtener m modos de vibración de un eslabón con una precisión aceptable a partir de un modelo FEM de m elementos.

En ambos métodos se representa la deformación flexible mediante la combinación lineal de funciones espaciales y temporales. En el caso de AMM, la función de modos es global (ya que esta define la longitud completa del eslabón) y esta compuesta por funciones trigonométricas. Esto hace que obtener las matrices de masa y rigidez resulte complejo. En el caso general (cuando la geometría de los manipuladores es compleja), no es posible obtener una solución en forma cerrada. Por otro lado, la convergencia monotónica de la solución esta garantizada [21].

En FEM, por el contrario, las funciones de modos son polinomiales y locales, es decir, están definidas en un subdominio del eslabón. Debido a esta última característica, es sencillo obtener la solución cerrada del sistema, incluso cuando la geometría de los eslabones es compleja. Por otro lado, las funciones de modos son todas iguales, la misma para cada elemento con los que esta compuesto el manipulador, pero sin embargo no es posible garantizar la convergencia monotónica [21].

Una de las complicaciones del modelo de modos asumidos es que la ecuación de valores propios, (18), es, en general, dependiente del tiempo cuando se tiene en cuenta las condiciones de masa en el extremo. Aunque ciertos autores hayan despreciado los términos dependientes del tiempo [8], despreciarlos puede acarrear funciones de modos inadecuadas y frecuencias propias sobrestimas [26]. Por el otro lado, tener estos términos en cuenta hace que se eleve la complejidad computacional, ya que se requiere de las soluciones de la ecuación de frecuencia (tantas como modos se utilicen) en cada ciclo de ejecución, siendo necesario el uso de técnicas de análisis numérico. Por lo tanto, a pesar de que el número de ecuaciones diferenciales a resolver es mayor, el número de operaciones requeridas para el cálculo de las matrices es menor en FEM en comparación con AMM. Este factor es principalmente importante cuando se tienen más de un eslabón, ya que la computación de la función de modos se ha de hacer inevitablemente *on-line* y mediante métodos numéricos.

En la Figura 3 se observa la respuesta de los modelos discretizados (4 modos/elementos) para ambos métodos. Como se puede observar, ambas respuestas son similares, exceptuando que la respuesta dada por el método de elementos finitos esta ligeramente retardada en el tiempo en comparación con la de AMM. Esto es debido a que la aproximación FEM, generalmente, sobrestima ligeramente las frecuencias naturales originales del sistema. Este efecto se puede observar mejor en el cuadro 2, donde se comparan una a una las frecuencias naturales obtenidas a partir de uno y otro método. Por otro lado, en dicha tabla también se puede observar como tanto la respuesta del modelo AMM como FEM obtienen una precisión aceptable con tan solo dos modos/elementos, confirmando así la observación realizada por [24].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 2: Comparativa de frecuencias naturales [Hz] del sistema con ambos métodos.

Modos/Elementos	$f_1 = 11{,}4872Hz$		$f_2 = 32{,}2651Hz$		$f_3 = 59{,}4245Hz$		$f_4 = 106{,}2965Hz$	
	FEM	**AMM**	**FEM**	**AMM**	**FEM**	**AMM**	**FEM**	**AMM**
2	11,5235	11.5075	32,9993	34.7172	-	-	-	-
3	11,4961	11.5014	32,3891	32.3411	60,2261	60.8239	-	-
4	11,4902	11.4915	32,3078	32.3360	59,7679	59.6299	108,2607	108.0346

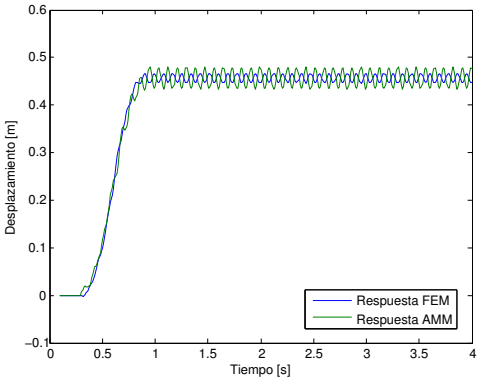


Figura 3: Comparativa de la respuesta obtenida mediante el modelo discretizado en AMM y FEM.

8. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una metodología sistemática del modelado dinámico basada en matrices de transformación homogénea para manipuladores flexibles en el plano. La flexibilidad de estos eslabones se ha aproximado mediante modelos de discretización, más concretamente, el método de modos asumidos y el método de elementos finitos. Los resultados obtenidos han sido comparados para el caso de un sólo eslabón. Este artículo concluye que el método de modos asumidos resulta más recomendable para la discretización de un manipulador de un eslabón de sección transversal constante. Por el contrario, el método de elementos finitos resulta más apropiado para eslabones de secciones transversales no-uniformes y/o sistemas multi-eslabón debido a que resulta más sencillo de modelar y computacionalmente más eficiente. Por lo tanto, FEM es idealmente el método de discretización más apropiado para la implementación en controladores en tiempo real basados en modelo de robots paralelos de alto rendimiento, tal y como se pretende realizar en un futuro (una vez modificado el método para su uso en este tipo de robots).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO&FEDER en el marco del proyecto DPI-2012-32882, así como por los proyectos BES-2013-066142 del ministerio de Economía y Competitividad, IT719-13 del Gobierno Vasco y UFI11/28 de la UPV/EHU.

Referencias

[1] J. Aubrun. Theory of the Control of Structures by Low-Authority Controllers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 3(5):444–451, Sept. 1980.

[2] F. Bellezza, L. Lanari, and G. Ulivi. Exact modeling of the flexible slewing link. In *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 734–739. IEEE Comput. Soc. Press, 1990.

[3] W. Book. Modeling, design, and control of flexible manipulator arms: a tutorial review. In *29th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 500–506 vol.2. IEEE, 1990.

[4] W. Book, G. Hastings, and T. Alberts. Design strategies for high-speed lightweight robots. *Computers in Mechanical Engineering, September*, 5(2):26–33, 1986.

[5] W. J. Book. Recursive Lag rangian Dynamics of Flexible Manipulator Arms via Transformation Matrices. Technical Report December, Georgia Institute of Technology Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1983.

[6] S. Cetinkunt and B. Ittoop. Computer-automated symbolic modeling of dynamics of robotic manipulators with flexible links. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(1):94–105, 1992.

[7] R. R. Craig. *Structural dynamics: an introduction to computer methods*. 1981.

[8] a. De Luca and B. Siciliano. Closed-form dynamic model of planar multilink lightweight robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(4):826–839, 1991.

[9] S. Dubowsky. Dealing with vibrations in the deployment structures of space robotic systems. In *5th International Conference on Adaptive Structures*, Sendai, Japan, 1994.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[10] S. K. Dwivedy and P. Eberhard. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and Machine Theory*, 41(7):749–777, July 2006.

[11] V. Feliu, K. S. Rattan, and H. B. Brown. Modeling and Control of Single-Link Flexible Arms With Lumped Masses. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 114(1):59, 1992.

[12] S. Gharooni, B. Heller, and M. O. Tokhi. A new hybrid spring brake orthosis for controlling hip and knee flexion in the swing phase. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 9(1):106–7, Mar. 2001.

[13] S. Gruber and W. Schiehlen. Biped walking machines: a challenge to dynamics and mechatronics. In *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, 2002.

[14] G. Hastings and W. Book. Verification of a linear dynamic model for flexible robotic manipulators. In *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 1024–1029. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.

[15] G. Hastings and W. Book. A linear dynamic model for flexible robotic manipulators. *IEEE Control Systems Magazine*, 7(1):61–64, Feb. 1987.

[16] W. Khalil and M. Gautier. Modeling of mechanical systems with lumped elasticity. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, volume 4, pages 3964–3969. IEEE, 2000.

[17] J.-S. KIM and M. UCHIYAMA. Vibration Mechanism of Constrained Spatial Flexible Manipulators. *JSME International Journal Series C*, 46(1):123–128, 2003.

[18] R. Kress, L. Love, R. Dubey, and A. Gizelar. Waste tank cleanup manipulator modeling and control. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 662–668, Albuquerque, NM, 1997. IEEE.

[19] R. Kumar, P. Berkelman, P. Gupta, A. Barnes, P. Jensen, L. Whitcomb, and R. Taylor. Preliminary experiments in cooperative human/robot force control for robot assisted microsurgical manipulation. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*, volume 1, pages 610–617, San Francisco, CA, 2000. IEEE.

[20] L. Meirovitch. *Analytical methods in vibrations*. 1967.

[21] L. Meirovitch. *Elements of Vibration Analysis*. 1975.

[22] G. Naganathan and A. Soni. Non-linear flexibility studies for spatial manipulators. In *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 373–378. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.

[23] C. Oakley and R. C. Jr. End-point control of a two-link manipulator with a very flexible forearm: Issues and experiments. In *American Control Conference*, pages 1381–1389, Pittsburgh, PA, USA, 1989. IEEE Comput. Soc. Press.

[24] J. Przemieniecki. *Theory of matrix structural analysis*. 1985.

[25] M. H. Shaheed, H. Poerwanto, and M. O. Tokhi. Adaptive Inverse-Dynamic and Neuro-Inverse-Dynamic Active Vibration Control of a Single-Link Flexible Manipulator, 2006.

[26] R. J. Theodore and A. Ghosal. Comparison of the Assumed Modes and Finite Element Models for Flexible Multilink Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 14(2):91–111, Apr. 1995.

[27] S. S. Timoshenko. *History of Strength of Materials: With a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures*. Courier Dover Publications, 1983.

[28] A. Tokhi, M.O.; Azad. *Flexible Robot Manipulators: Modelling, Simulation and Control*. IET, 2008.

[29] J. Tokhi, MO; Mohamed, Z; Martins, JM; Botto, M.A.; Sa da Costa. Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator systems. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, 150(4):401–411, July 2003.

[30] P. Tomei and A. Tornambe. Approximate modeling of robots having elastic links. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(5):831–840, 1988.

[31] A. Zubizarreta, I. Cabanes, M. Marcos, and C. Pinto. A redundant dynamic model of parallel robots for model-based control. *Robotica*, 31(02):203–216, May 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA AÉREA PARA LA CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

J.A. Rodríguez-Haro[a], J.C. Moreno[a], J.L. Guzmán[a], F. Aguilar[b], Y. Cantón[b]
[a]Departamento de Informática, [b]Departamento de Ingeniería
Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120
juanroha@gmail.com, jcmoreno@ual.es, joseluis.guzman@ual.es, faguilar@ual.es, ycanton@ual.es

Resumen

En este artículo se enumeran y se explican los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño y construcción de una plataforma aérea capaz de transportar un escáner láser o una cámara multiespectral (en general cualquier tipo de sensor con un peso inferior a 2kg) para la captación de información topográfica.

Palabras Clave: Diseño, construcción, plataforma aérea, topografía, multirotor.

1 INTRODUCCIÓN

Los avances en robótica han permitido que vehículos autónomos puedan llevar a cabo tareas tediosas o de cierto riesgo para la seguridad. En las últimas décadas, el desarrollo de los vehículos autónomos ha sido de gran interés y numerosos tipos de vehículos se han desarrollado en todo el mundo. Basándose en su ambiente de trabajo, se pueden clasificar en aéreos (UAVs), terrestres (UGVs) y acuáticos (AUVs). Los UAVs en especial, tienen numerosas aplicaciones en situaciones de emergencia ya que permiten un acercamiento a zonas donde se han producido terremotos, inundaciones, volcanes activos e incluso catástrofes nucleares, y que por lo tanto son de difícil o peligroso acceso para humanos.

Entre la gran variedad de UAVs que han sido creados, los llamados "small-scale HUAVs" (helicopter-based UAVs) o "Vertical take-off and landing" (VTOL) UAVS [11] son capaces de despegar y aterrizar totalmente en vertical, además de alcanzar altas velocidades de crucero. Pero sin duda su mayor ventaja es la de "flotar", es decir, son capaces de mantener una posición fija a una altura establecida, permitiendo de este modo una mayor eficacia en el reconocimiento y observación de objetivos. Otra ventaja crucial, que justifica el interés suscitado en este tipo de UAV, es su bajo coste de producción y de operación.

Un VTOL se puede presentar con diferentes configuraciones, con rotor principal y rotor de cola (helicópteros), rotores coaxiales, rotores en tándem o multirotores. Estos últimos (figura 1), son los que se están empleando en la mayoría de aplicaciones con robots aéreos, desde la revisión de líneas aéreas de alta tensión, inspección de bosques con cámaras térmicas, fotografía aérea, hasta el empleo de estos vehículos como plataformas para escáneres láseres de reconstrucción de superficies terrestres. Todo ello debido principalmente a su gran estabilidad de vuelo, a su completo control autónomo, su bajo coste y a la posibilidad de volar con vientos sostenidos de 65 km/h y rachas de hasta 90 km/h [1].

Figura 1: Aeryon SkyRanger [1]

Hasta hace un par de años, los escáneres láseres aerotransportados procedentes de los principales fabricantes no se habían podido montar en UAVs con fines comerciales, debido principalmente a su gran tamaño y peso y a las limitaciones de carga de estas ligeras aeronaves. Sin embargo, recientemente varios fabricantes han realizado numerosos esfuerzos para ser capaces de desarrollar escáneres laser concebidos para ser montados en estos aparatos, empleándose en sistemas de mapeo móviles [16].

Este trabajo se centra en los aspectos básicos a tener en cuenta en el diseño, desarrollo, construcción y ajuste de una plataforma aérea capaz de transportar y operar un sensor con tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging) [23], una cámara con tecnología TOF (Time Of Fligth) [25] o un sistema de imagen multiespectral [24], que permita el reconocimiento de superficies terrestres.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

Una gran ventaja de los multirotores es el escaso número de componentes necesarios para su correcto funcionamiento. Cuando se trata de la realización de actividades con fines profesionales o industriales, el equipamiento necesario para la tarea tiende a ser más costoso, más pesado y más voluminoso; por lo que los componentes que integran las estructura principal del multirotor juegan un papel crucial, garantizando la rigidez, la potencia y la estabilidad necesaria para llevar a cabo las operaciones de manera controlada.

Ese alto nivel de la calidad en los componentes ha sido el responsable de que plataformas aéreas destinadas a labores industriales tengan un coste tan elevado que un gran número de empresas no muestran interés en ellos.

El objetivo principal de este artículo es conseguir una plataforma aérea para fines de reconstrucción de superficies terrestres con el menor coste posible, pero sin prescindir de la seguridad y calidad de los sistemas comerciales mucho más costosos.

2.1 SELECCIÓN DEL LA ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA AÉREA

2.1.1 Distribución y número de motores necesarios

Son numerosas las posiciones y orientaciones que pueden presentar los motores en un multirotor. Si bien las más extendidas son tres (figura 2), cuatrirotor (cuatro motores), hexarotor (seis motores) y octorotor (ocho motores). En todas ellas, todos los motores están colocados sobre el mismo plano y con el eje de rotación del motor perpendicular al suelo.

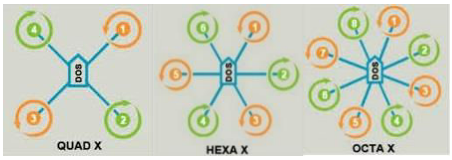


Figura 2: Distribuciones más comunes de los motores

La estructura sencilla del cuatrirotor lo hace ideal para emplearlo como plataforma de ensayos debido a su ligereza y facilidad de programación, pero tienen el gran inconveniente de que cuando se produce el fallo de un motor, no son capaces de soportar un vuelo estable el tiempo necesario como para poder realizar un aterrizaje de emergencia, de modo que acaban estrellándose. Sin embargo, no ocurre lo mismo en los hexarotores y octorotores, ya que un mayor número de rotores (redundancia), permite el funcionamiento "controlable" del aparato y su aterrizaje aun cuando se produce una avería en alguno de sus motores, siendo de gran importancia para este caso el firmware, ya que será el encargado de compensar la pérdida de empuje y rotación que ocasiona el fallo de un motor.

Es por ello que la plataforma aérea que se desea construir deberá tener un mínimo de seis rotores. De esta forma al aumentar el número de motores, se disminuye el tamaño de hélice necesario, consiguiendo un vuelo más suave que su equivalencia en un cuatrirotor con hélices de mayores dimensiones.

La carga máxima que debe poder soportar la plataforma aérea (sin tener en cuenta el peso del propio vehículo) está fijada en 2kg, por lo que no es necesario emplear una estructura con 8 rotores, ya que unos buenos motores proporcionarán potencia suficiente sin la necesidad de aumentar el número total, resultando más barato y disminuyendo de esta forma la probabilidad de que algún elemento falle al reducir el número de componentes móviles.

2.1.2 Selección de un modelo de estructura comercial

En el mercado hay numerosas estructuras de todo tipo de materiales: plástico, aluminio, fibra de vidrio,…, pero si se desea conseguir la rigidez máxima con el peso mínimo, se debe recurrir a la fibra de carbono. La elección ha sido una plataforma de la marca Tarot modelo T810 [7], fabricada en fibra de carbono 3K, con un diámetro total de 870mm, una distancia entre motores de 810mm y un peso de 1kg, (figura 3).

Figura 3: Estructura Tarot T810

2.2 SELECCIÓN DEL SOPORTE PARA EL DISPOSITIVO DE RECONSTRUCCIÓN

Cuando se trata de obtener una imagen aérea de una superficie, el principal problema es conseguir una captura estable, clara y con una orientación determinada independientemente de la situación del multirotor. Para ello, se debe incluir en la plataforma un sistema que se encargue de la estabilización del dispositivo.

En los últimos meses los estabilizadores con motores *brushless* han revolucionado el mercado, ofreciendo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

gran margen de estabilidad frente a perturbaciones. Sin embargo, unas limitaciones de peso muy exigentes son las responsables de su imposibilidad de uso en esta plataforma aérea, ya que el principal objetivo será que el soporte tenga una gran versatilidad que permita transportar cualquier sensor de tamaño medio destinado a reconstrucción o inspección de superficies terrestres cuyo peso no exceda de 2kg.

El modelo elegido es por tanto un estabilizador de servos de 3kg de par, fabricado totalmente en fibra de carbono 3K de la marca Tarot [6] que ofrece una estabilización en los tres ejes, *roll*, *pitch* y *yaw*.

2.3 TARJETA CONTROLADORA

El componente más importante de un multirotor es su tarjeta de control, en la cual se integran todo un conjunto de sensores encargados de mantener un vuelo estable y controlado, con la función adicional de realizar trayectorias de forma totalmente autónoma, sin necesidad de ser teleoperado.

Ardupilot 2.6 [22] es un sistema de código libre compatible con arduino [8], que permite la configuración total del hexarotor, además de una característica muy importante y diferenciadora con la mayoría de productos de los demás fabricantes: que permite la obtención de *datalogs* de forma *offline* y la posibilidad de representación de todos los parámetros de vuelo en directo.

La controladora incorpora:
- Chip de Atmel para procesamiento, ATMEGA2560.
- Chip para funciones USB, ATMEGA32U-2.
- 4 MegaBytes para Datalogging.
- Acelerómetro + Giróscopo de 3 ejes cada uno, MPU-6000 MEMS MotionTracking.
- Brújula digital de 3 ejes, HMC5883L-TR.
- Altímetro de alta resolución, MS5611, MEAS.
- GPS u-blox LEA6

2.4 MOTORES, VARIADORES DE POTENCIA, HÉLICES Y BATERÍAS

2.4.1 Tipo de motores, variadores de potencia y hélices

Los componentes de mayor importancia en la calidad del vuelo de una plataforma aérea son sus motores. Es el factor que determinará la carga total que podrá levantar y el tiempo máximo de vuelo. Se debe buscar por tanto la mayor eficiencia de los motores en vuelo. Para ello los fabricantes de productos de alta calidad realizan ensayos con sus motores y publican unas tablas de consumo frente a empuje, que pueden ser utilizadas por el cliente para concretar qué tipo de motor se debería emplear en función de la carga a levantar y el tiempo de vuelo que se quiera conseguir.

Para dotar a la plataforma aérea de motores, se ha llevado a cabo un pequeño estudio de tres motores de la marca T-Motor. Los modelos elegidos pertenecen a la gama *Navigator* y se denominan, MN4012KV340 [15], MN4012KV400 [15] y MN4010KV370 [14]. Todos ellos poseen un voltaje de funcionamiento recomendado de 22,2V, montan unas hélices de la propia marca [9], de 15” de diámetro fabricadas totalmente en fibra de carbono 3K, y los variadores de potencia (ESC) de cada motor [5], también de la misma marca y con un amperaje máximo de 40A.

En la figura 4 se muestra una representación gráfica de la curva de consumo frente empuje de los tres motores. A partir de estas curvas se puede comprobar qué motor es más eficiente para un peso conocido.

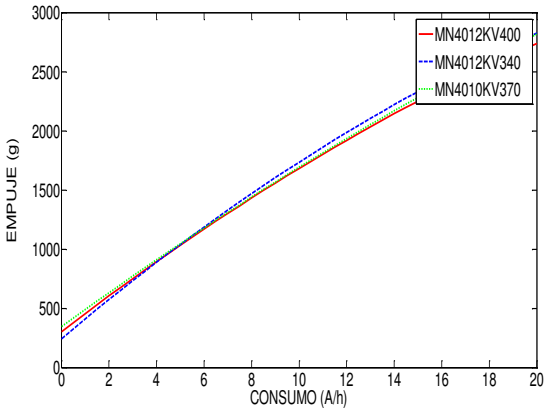


Figura 4: Comparativa de empuje frente a consumo de los tres motores, según datos de fabricante

A continuación se deberá estimar el peso total de la plataforma para conocer el valor del empuje mínimo que deberán realizar los seis motores en conjunto para mantener el vuelo sin variación de altitud.

2.4.2 Estimación del peso total de la plataforma aérea

Un factor de bastante importancia en el peso total del aparato son las baterías. Se debe conseguir un equilibrio en cantidad de A/h que puede cargar el hexarotor y el peso total que ello supone. En este caso se decide emplear baterías de tecnología LIPO, ampliamente utilizadas en el mundo del radiocontrol debido a su gran tolerancia a ratios de descarga muy elevados, con un voltaje nominal de 22,2V y una capacidad de 8000mA/h por unidad [3]. La posibilidad de acoplar más de una batería en paralelo se estudiará en el apartado 2.4.3. En la tabla 1 se reflejan los resultados.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 1: Peso unitario de cada elemento que se empleará en la plataforma aérea

Nombre	Masa(g)
Estructura hexarotor	1100
Gimbal	1000
Motores	130
Variadores 40A	35
Controladora	75
Hélice	Despreciable
Batería	1105
Carga	2000

A continuación se calcula el peso de la plataforma contemplando la opción de cargar una o dos baterías haciendo uso de la ecuación (1).

$$M_{Total} = m_{Gimbal} + m_{Estrucura} + m_{Controladora} + N_{Motores} \cdot m_{Motor} + N_{Variadores} \cdot m_{Variador} + m_{carga} + N_{Baterias} \cdot m_{Batería} \quad (1)$$

2.4.2.1 Cálculo de la masa total de la plataforma aérea con una sola batería:

Mediante (1), se obtiene que:

$$M_{Total}(g) = 1000 + 1100 + 75 + 6 \cdot 130 + 6 \cdot 35 + 2000 + 1 \cdot 1105 = 6270g$$

Por tanto, el empuje necesario de cada motor se obtiene mediante (2), resultando en lo siguiente:

$$E(g) = \frac{M_{Total}(g)}{N_{Motores}} \quad (2)$$

$$E(g) = 1045g/motor$$

2.4.2.2 Cálculo de la masa total de la plataforma aérea con dos baterías:

De nuevo, mediante (1) se obtiene:

$$M_{Total}(g) = 1000 + 1100 + 75 + 6 \cdot 130 + 6 \cdot 35 + 2000 + 2 \cdot 1105 = 7375g$$

Y por tanto, el empuje necesario de cada motor se obtiene mediante (2):

$$E(g) = 1229g/motor$$

2.4.3 Cálculo del consumo de cada modelo de motor para cada distribución de baterías

A partir de los datos obtenidos en el apartado anterior, se puede obtener por medio de una interpolación de las curvas de la figura 4, un valor aproximado del consumo del motor para un empuje determinado, en este caso, 1045 gramos cuando sólo se porta una batería, y 1229 gramos cuando porta dos. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2: Comparativa del consumo de cada modelo de motor en función del número de baterías a transportar y con una carga fija de 2kg

	Consumo (A)	
Modelo del motor	**1 Batería**	**2 Baterías**
MN4012KV340	5,03	6,30
MN4012KV400	5,10	6,45
MN4010KV370	5,05	6,40

2.4.4 Análisis de resultados y selección del motor

A vista de los resultados que se muestran en la tabla 2, los tres motores poseen un consumo muy similar, si bien destaca el modelo MN4012KV340 por tener el consumo menor, convirtiéndolo de esta forma en el motor elegido. Otro factor decisivo en su elección es que si se produce un aumento de peso por incorporación de un elemento externo temporal, el modelo MN4012KV340 será capaz de producir más empuje con el mismo consumo que los demás tal y como queda reflejado en la figura 4.

2.5 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO MÁXIMO DE VUELO

Conocido el consumo de amperios por hora del motor, se puede estimar el tiempo de vuelo del hexarotor a partir del número de baterías que se carguen.

El tiempo total de vuelo en minutos se puede obtener como:

$$t(min) = \frac{Capac.baterías(A \cdot h)}{1{,}1 \cdot Consumo\ total\ (A)} \cdot \frac{60min}{1h} \quad (3)$$

Como se observa en (3), el consumo total de los motores es incrementado en un 10% para simular el proceso de colocación a altura de trabajo y posibles correcciones de posición que conlleven consumos puntuales superiores a los estimados. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3: Tiempo de vuelo máximo estimado para el motor MN4012KV340 en función del número de baterías a transportar y con una carga fija de 2kg

Nº de Baterías	Tiempo máximo de vuelo estimado
1 Batería	14’ 45’’
2 Baterías	23’ 6’’

Es importante resaltar que el tiempo obtenido es para un valor de carga máxima de 2kg. Pero si el hexarotor

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

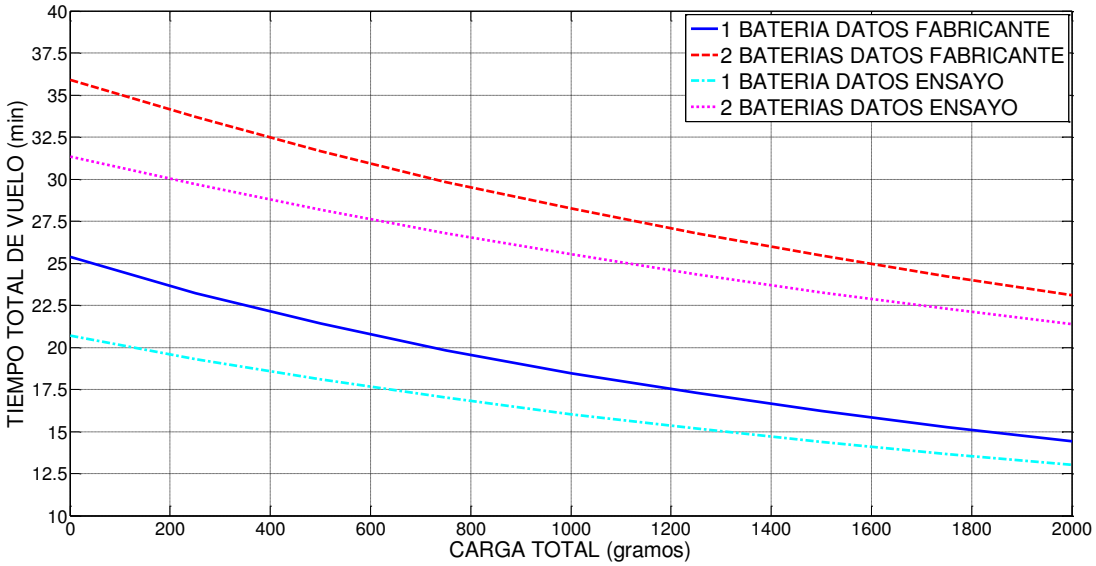


Figura 5: Representación del tiempo total de vuelo en función de la carga a levantar

volara con menor peso, este tiempo se vería incrementado. Para poder saber en cualquier momento el tiempo de vuelo aproximado en función de la carga y número de baterías, se ha representado en la figura 5 el tiempo de vuelo **estimado a partir de los datos del fabricante** frente al peso de la carga. Dependiendo del número de baterías que transporte el hexarotor (1 batería, línea azul continua; 2 baterías, línea roja discontinua), el tiempo total variará.

2.6 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE VIDEO Y TELEMETRÍA

Para poder obtener todos los datos de los sensores que porta la placa Ardupilot 2.6, cuando el hexarotor está en el aire, es necesario establecer una comunicación inalámbrica entre éste y la estación de tierra. Para ello se emplea la tecnología Zigbee [18], ya sea por medio del uso de dos placas Xbee o mediante el modelo comercial que proporciona Ardupilot [20] (3DR radio).

ArduPilot proporciona una comunicación serie por medio del protocolo MavLink [17], que permite representar gráficamente todos los parámetros utilizando el programa QGroundControl [19], como se muestra en la figura 6.

Por otro lado, se puede instalar en la propia plataforma un sistema de transmisión de video que permita visualizar en una pantalla el campo de visión de la cámara o escáner (si permite salida de video) en todo momento con el fin de mejorar las capturas. Se aconseja instalar un sistema que trabaje con una frecuencia de 5,8GHz para evitar solapes con la señal de control que se encuentra en la frecuencia de los 2,4GHz.

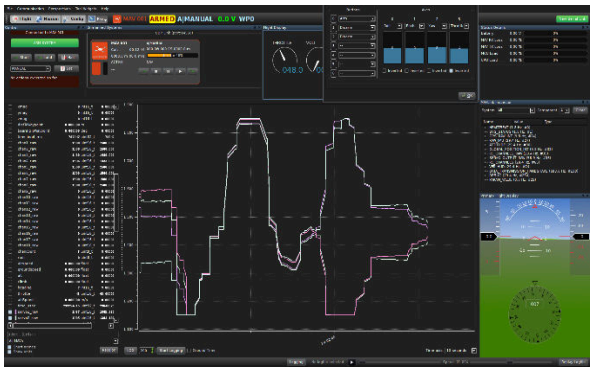


Figura 6: Representación de datos a través del programa QGroundControl

3 RESULTADOS

3.1 ENSAYO CON MOTOR MN4012KV340

Una vez que se han seleccionado y adquirido todos los materiales, comienza el proceso de construcción y puesta a punto de todos los componentes. En primer lugar se debe realizar una prueba de potencia a los motores, para verificar que los datos ofrecidos por el fabricante son de confianza y que por lo tanto se van a cumplir los tiempos calculados en el apartado 2.5.

Se coloca el motor, con la hélice ya acoplada, sobre un banco de pruebas fijado a una balanza digital. Se coloca un amperímetro entre la batería y el ESC (tal y como se muestra en la figura 7) y se pone en marcha el motor. Es recomendable establecer unos puntos de funcionamiento previos al ensayo para anotar los valores de consumo de amperios. En el caso de este

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ensayo, los puntos se tomaron cada 250 gramos de empuje con un intervalo de 0 a 3000 gramos.

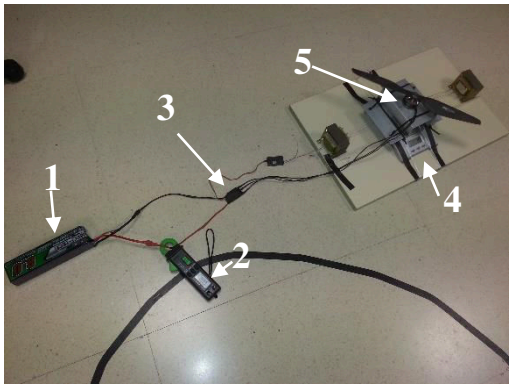


Figura 7: Montaje para realización de toma de datos del motor (1-Batería 8000mAh, 2-Amperímetro digital, 3-Variador de potencia, 4-Báscula digital, 5-Motor MN4012KV340 con hélice de carbono)

Los resultados del tiempo de vuelo **obtenidos a partir del ensayo** se representan en la figura 5, para una y para dos baterías, junto con los datos proporcionados por el fabricante. Claramente se pueden observar las diferencias entre los datos aportados por el fabricante y los resultados del banco de ensayo. Esto es fundamental para la puesta a punto de la plataforma aérea.

3.2 CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO

El primer elemento que se debe montar es la estructura base para poder realizar la distribución de todos los componentes electrónicos. En el caso de esta plataforma aérea se opta por utilizar una placa de distribución (figura 8) para alimentar todo el conjunto de ESC, evitando de esta forma, problemas con las uniones soldadas entre los cables.

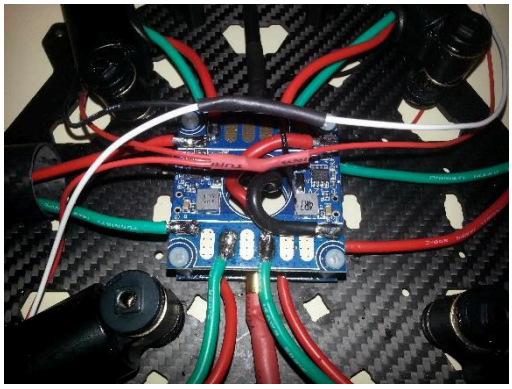


Figura 8: Placa de distribución de potencia

Una vez montados los motores y la estructura, se deben programar y calibrar los ESC para asegurar que todos responden a una entrada determinada con la misma salida y descartar de esta forma posibles problemas de funcionamiento (figura 9).

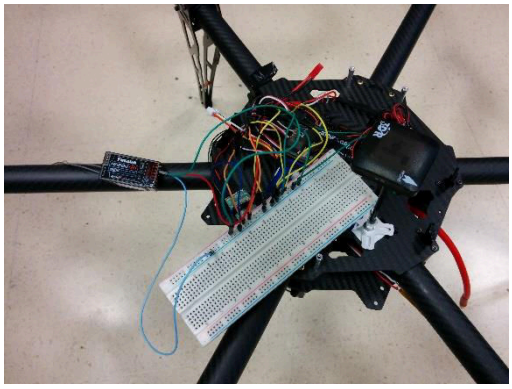


Figura 9: Programación y calibración de los ESCs del hexarotor

Terminado el proceso de montaje, se carga el programa deseado en la controladora. En este caso se va a hacer uso del propio código que desarrolla la compañía Ardupilot de software libre [21] y que permite configurar y tener acceso a múltiples modos de vuelo. Asimismo se programan las trayectorias autónomas mediante *waypoints* a través del programa MissionPlanner [13].

Una vez cargado el código es aconsejable volar el hexarotor con unas sujeciones, como se muestra en la figura 10, que permita comprobar si estabiliza correctamente.

Figura 10: Sistema de sujeción aconsejado para comprobación de vuelo

Aprovechando que el aparato se encuentra sujeto, es aconsejable realizar un primer ajuste de los principales controladores del mismo a partir del esquema de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

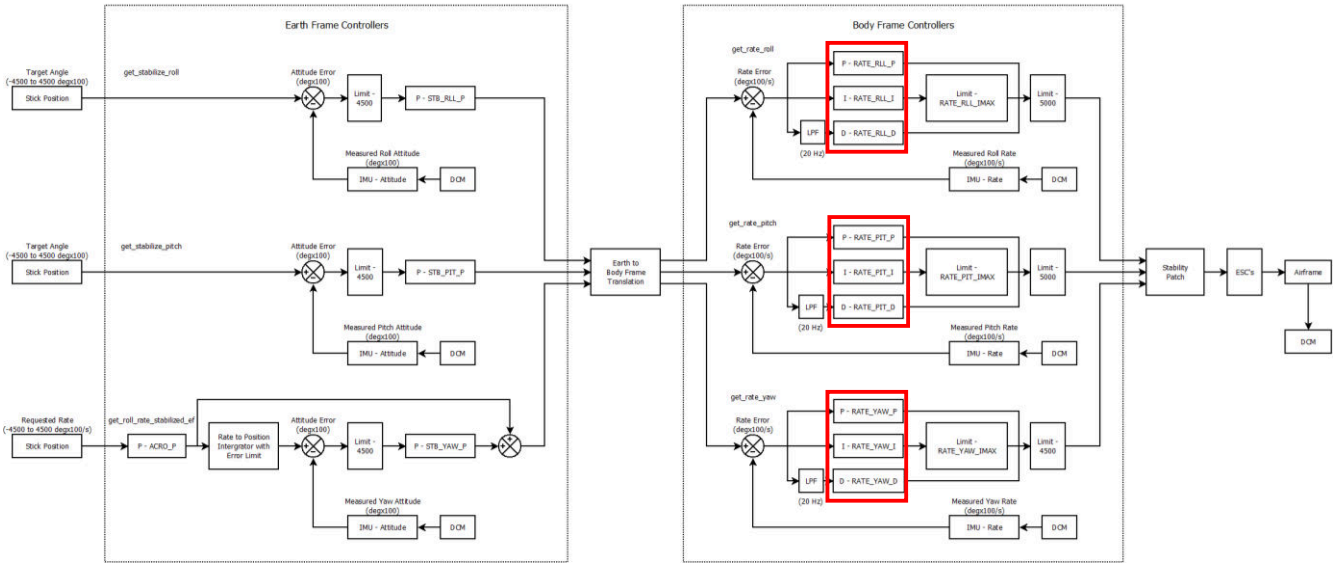


Figura 11: ArduCopter V3.1 Stabilize Roll, Pitch and Yaw PID´s (100Hz rate update)

control PID [10] que proporciona Ardupilot y que se muestra en la figura 11. Se deben configurar los parámetros que se encuentran encuadrados en rojo y que son los encargados de convertir la velocidad angular deseada en cada eje, a la correspondiente señal de salida para cada motor.

3.2 IMÁGENES MULTIESPECTRALES OBTENIDAS EN UN ENSAYO CON ESTA PLATAFORMA AÉREA

Como ejemplo de una de las aplicaciones a las que se va a destinar la plataforma aérea, la figura 12, muestra una imagen obtenida en el primer ensayo real realizado en la Universidad de Almería. En este ensayo se toma una foto con la cámara multiespectral tetracam ADC [4] de la vegetación del campus. La figura 13 muestra la imagen procesada para la determinación de la masa vegetal.

Figura 12: Fotografía multiespectral del campus universitario

Figura 13: Fotografía post-procesada que muestra las zonas de vegetación en color rojo

4 CONCLUSIONES

Uno de los objetivos de este artículo era construir una plataforma aérea para la captura de información topográfica con prestaciones similares a los modelos de los fabricantes reconocidos internacionalmente, pero con un coste mucho menor.

En la tabla 4 se compara el coste de fabricación del hexarotor con el precio de compra de 3 modelos comerciales.

El coste de los componentes del hexarotor ha sido de 3500 € y el coste en horas de montaje por un profesional se puede estimar en unos 2000 € (asumiendo 40 euros por hora de trabajo). Por tanto, el coste total de la plataforma aérea asciende a 5500 €.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 4, Comparativa de los precios y principales característica de los modelos comerciales con el hexarotor de fabricación propia (* el tiempo de vuelo es el calculado cuando se transporta la carga máxima. **El fabricante no facilita datos concretos de carga máxima)

Nombre comercial	**Coste**	**Nº rotores**	**Tiempo vuelo***	**Carga max.**
Hexarotor	5500 €	6	22’	2 kg
Aeryon SkyRanger [1]	50000 € (modelo básico)	4	50’	**
Aibotix X6 V2 [2]	44000 € (modelo básico)	6	30’	2 kg
md4-1000 [12]	40000 € (modelo básico)	4	88’	1,2 kg

Como puede apreciarse en la tabla 4, el precio final es bastante inferior a cualquiera de las 3 soluciones proporcionadas por cada fabricante, si bien el tiempo de vuelo es bastante reducido si se compara con los 88 minutos que garantiza Microdrone con su md4-1000, pero si la tarea que realiza el hexarotor no precisa de un tiempo de vuelo continuo de más de 20 minutos, siempre se puede optar por aterrizar y sustituir las baterías agotadas por nuevas.

Agradecimientos

El trabajo ha sido parcialmente desarrollado en el marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX 2008-2013, mediante el proyecto de referencia 0065_COPTRUST_3_E BACARCOS y en el marco del Plan Nacional Español de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto de referencia CGL2011-29429.

Referencias

[1] Aeryon SkyRanger (Consultado 11/07/2014): http://www.aeryon.com/products/avs/aeryon-skyranger.html

[2] Aibotix X6 V2 (Consultado el 10/06/2014): http://www.aibotix.com/technical-data.html

[3] Batería 8000mAh 6s 22,2V (Consultado el 10/06/2014): http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=32729

[4] Cámara multiespectral tetracam ADC (Consultado el 10/06/2014): http://www.grupoacre.com/uavs/productos/ver/camara-multiespectral-tetracam-adc

[5] ESC T-motor 40A 400Hz (Consultado el 10/06/2014): http://www.rctigermotor.com/html/2013/esc_0916/84.html

[6] Estabilizador para cámara multiespectral o escáner láser (Consultado el 10/06/2014): http://www.foxtechfpv.com/tarot-5d2-gimbal-p-965.html

[7] Estructura Tarot T810 (Consultado el 10/06/2014): http://www.tarot-rc.com/index.php?main_page=product_info&cPath=65_66&products_id=996

[8] Evans, Brian. 2007. *Arduino programming notebook*. Creative Commons.

[9] Hélices fibra de carbono de 15’’ de diámetro (Consultado el 10/06/2014): http://www.rctigermotor.com/html/2013/prop_0805/16.html

[10] K.J. Aström; T. Hägglund, 2010. *Control PID Avanzado*, Ed. Pearson Education.

[11] K. Nonami; F. Kendoul; S. Suzuki; W. Wang; D. Nakazawa. 2010. *Autonomous flying robots*. Springer; New York; 329pp.

[12] Microdrone md4-1000 (Consultado 11/07/2014): http://www.microdrones.com/products/md4-1000/md4-1000-key-information.php

[13] MissionPlanner (Consultado el 10/06/2014): http://ardupilot.com/downloads/?did=82

[14] Motor RC Tiger Motor MN4010KV370 (Consultado el 10/06/2014): http://www.rctigermotor.com/html/2013/Navigator_0910/38.html

[15] Motor RC Tiger Motor MN4012KV340 y MN4012KV370 (Consultado el 10/06/2014): http://www.rctigermotor.com/html/2013/Navigator_0910/39.html

[16] Petrie, Gordon. 2013. *Current developments in airborne laser scan*. Geo Informatics.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[17] Protocolo MAVlink (Consultado el 10/06/2014): http://qgroundcontrol.org/mavlink/start

[18] Protocolo Zigbee (Consultado el 10/06/2014): http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx

[19] QGroundControl (Consultado el 10/06/2014): http://www.qgroundcontrol.org/

[20] Set de telemetría 3DR Radio (Zigbee) (Consultado el 10/06/2014): http://store.3drobotics.com/products/3dr-radio

[21] Software Ardupilot 3.1.6 (Consultado el 10/06/2014): https://github.com/diydrones/ardupilot

[22] Tarjeta controladora de vuelo Ardupilot 2.6 (Consultado el 10/06/2014): http://store.3drobotics.com/products/apm-2-6-kit-1

[23] Tecnología LIDAR (Consultado el 10/06/2014): http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx

[24] Tecnología multiespectral (Consultado el 10/06/2014): http://www.init.uji.es/index.php?option=com_content&view=article&id=94:aplicacionesdeimagenesmultiespectrales&catid=57:servicios-vision-por-ordenador&Itemid=47&lang=es

[25] Ringbeck, Thorsten; Hagebeuker, Bianca. 2007. *A 3D time of flight camera for object detection.* PMDTechnologies; Zürich.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL OF OSCILLATING WATER COLUMN (OWC) WAVE ENERGY PLANTS

Aitor J. Garrido†, Mikel Alberdi, Izaskun Garrido and Modesto Amundarain

Automatic Control Group - ACG
Department of Automatic Control and Systems Engineering
University of the Basque Country - UPV/EHU
Paseo Rafael Moreno, 3, 48013 Bilbao, Spain
{aitor.garrido; mikel.alberdi; izaskun.garrido; molty.amundarain @ehu.es}
†*Corresponding author:* phone: +34-94-601-4469; fax: +34-94-601-4300

Abstract

Wave energy composes a direct and easy way of harnessing power from the Ocean. Among the different techniques used, OWC devices stand as one of the most promising ones. NEREIDA MOWC demonstration project is a breakwater wave plant located in the Basque location of Mutriku, using Wells turbines and Doubly Fed Induction Generators (DFIGs). Since one of the main objectives when dealing with renewable energies is to make them economically viable to compete with fossil fuels and nuclear fission, all technological improvements are particularly welcome. In this context, this paper presents a control scheme for OWC wave power generation plants that allows to avoid the undesired stalling phenomenon present in Wells turbines. The proposed controller does appropriately adapt the rotational speed according to the pressure drop entry. The results show that the system avoids the stalling behaviour and that the active power of the generator fed into the grid is significantly higher in the controlled case than in the uncontrolled one.

Keywords: Ocean Energy, Wave Energy, OWC, Doubly-Fed Induction Generator, Wells Turbine, Stalling Behaviour.

1 INTRODUCTION

The aim of the NEREIDA MOWC project, promoted by the Basque Energy Board (Ente Vasco de Energía - EVE), is to demonstrate the feasibility of the OWC technology with Wells turbine power take-off into a newly constructed breakwater in Mutriku, in the north coast of Spain. It consist of of 16 18.5kW turbines that provide a total power of 296kW [1,2]. See Fig 1. It was inaugurated in July 2011 and produced 200.000kWh during the first year while it was estimated a 600.000kWh production per year. Although the difference if mainly due to a storm that damaged the control room and kept the facility closed during the best wave months, an improvement in the power generation could highly benefit the system.

Fig. 1. MOWC plant of Mutriku

OWC is considered as one of the best techniques to convert wave energy into electricity. The bottom of the chamber is open to allow water to enter, so that the vertical oscillations of the waves on the outside induce vertical motions inside the chamber (see Fig. 2). As the internal water column oscillates, it displaces the air above

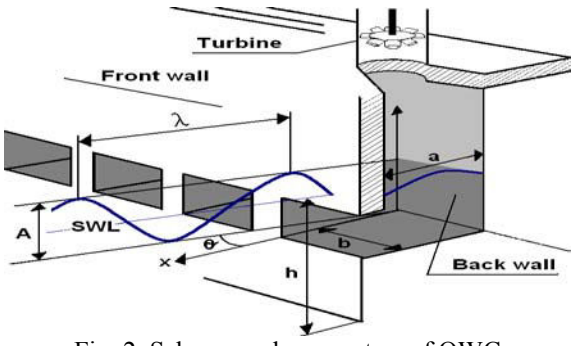


Fig. 2. Scheme and parameters of OWC

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

causing a bi-directional flow through an aerodynamic turbine. Wells turbine, the most popular air turbine in wave energy applications, converts this bi-directional flow in a unidirectional rotational movement. Nevertheless, this kind of turbines are known to be particularly sensitive to airflow rate, since their efficiency drops drastically when the airflow rate exceeds a critical value depending on the turbine's rotational speed. Thus, adequately matching the DFIG speed to the available wave energy level increases the turbine performance.

2 OWC PLANT MODELLING

In order to achieve a good plant description, a full modelling wave-to-plant must be performed. A number of regular wave theories have been developed to describe the water particle kinematics associated with ocean waves. Fortunately, the earliest description, attributed to Airy in 1845, is sufficiently accurate for many engineering purposes [3]. Linear wave theory describes ocean waves as simple sinusoidal waves.

A wave resource is typically described in terms of power per meter of wave front [4].

$$P_{wavefront} = \frac{\rho_w g H^2 L}{16T}\left[1+\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right] (\text{W/m}). \quad (1)$$

where, ρ_w is the seawater density, g is the gravitational constant, H is the wave height, L is the wavelength, T is the wave period and h is the water depth.

Equation (2) expresses the power available from the airflow in the OWC's chamber.

$$P_{in} = (p + \rho V_x^{\,2}/2)\, V_x\, a\,. \quad (2)$$

where, P_{in} is the pneumatic incident power, p is the pressure at the turbine duct, ρ is the air density, V_x is the air-flow speed at the turbine and a is the area of turbine duct.

The equation for the system turbo-generator can be written as:

$$J\left(\frac{d\omega}{dt}\right) = T_t - T_g\,. \quad (3)$$

The input to the Wells turbine is the pulsating pressure drop across the turbine rotor which is generated due to the airflow from the OWC chamber. The equations for the turbine are:

$$dP = C_a K(1/a)[V_x^{\,2} + (r\omega_t)^2]\,. \quad (4)$$

$$T_t = C_t K r[V_x^{\,2} + (r\omega_t)^2]\,. \quad (5)$$

$$\phi = V_x (r\omega_t)^{-1}\,. \quad (6)$$

$$Q = V_x a\,. \quad (7)$$

$$K = \rho b n l/2\,. \quad (8)$$

where dP is the pressure drop across rotor, C_a is the power coefficient, k is one constant, V_x is the air-flow velocity, Q is the flow rate, r is the mean radius, ω_t is the turbine angular velocity, C_t is the torque coefficient, ϕ is the flow coefficient, ρ is the air density, b is the blade height, n is the number of blades and l is the blade chord length.

As is well-known, the main advantage of the d-q dynamic model of the machine is that all the sinusoidal variables in stationary frame appear as dc quantities referred to the synchronous rotating frame [5]. Hence, the equations for the generator are given by:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}\psi_{qs} + \omega_e \psi_{ds}\,. \quad (9)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}\psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs}\,. \quad (10)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r)\psi_{dr}\,. \quad (11)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r)\psi_{qr}\,. \quad (12)$$

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})\,. \quad (13)$$

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs})\,. \quad (14)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs})\,. \quad (15)$$

and the flux linkage expressions in terms of the currents can be written as follows:

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}\,.\,;\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}\,. \quad (16)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}\,.\,;\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}\,. \quad (17)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m\,.\,;\ L_r = L_{lr} + L_m\,. \quad (18)$$

where R_s, L_{ls}, R_r, L_{lr} are the stator resistance and leakage inductance, rotor resistance and leakage inductance respectively, L_s, L_r, L_m are the total stator and rotor inductances and magnetic inductance respectively, v is the voltage, i is the current, ψ is the flux linkage, ω_e is the stator supply frequency, P is the number of poles of the machine, ω_r is the rotor electrical speed (ω (P/2)), T_e is the electromagnetic torque and P_s, Q_s are the stator-side active and reactive powers respectively. The subscripts s and r denote stator and rotor values refereed to the rotor and the subscripts d and q denote the d-q axis components in the stationary reference frame.

The RSC is widely used to control the Wells turbine output power by means of speed control and the voltage measured at the grid terminals. A common feature in most DFIG-related papers is field oriented control (FOC), which enables decoupled control of active and reactive power. Aligning the d-axis of reference frame to be along the stator flux linkage (stator flux oriented control), we have:

$$\psi_{qs} = 0\,.\,,\ \psi_{ds} = \psi_s\,. \quad (19)$$

Using the equations, (16), (17) and (19) we have:

$$i_{qs} = -\frac{L_m i_{qr}}{L_s} \quad (20)$$

$$\psi_s = \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = L_m i_{ms}\,. \quad (21)$$

where i_{ms} is the stator magnetizing current. Using equations (20) and (21), the equation (13) will result in:

$$T_e = -\frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L^2 m}{L_s} i_{ms}\, i_{qr}\,. \quad (22)$$

Besides, using the equations (20) and (21) in (9) and (10) we have:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \psi_s\,. \quad (23)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_m \frac{d}{dt} i_{ms} - \omega_e \psi_{qs}\,. \quad (24)$$

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Considering that the stator is connected to the network and the influence of stator resistance is small, the magnetizing current, i_{ms} can be considered constant [5,6] and, therefore, the equations (23) and (24) can be rewritten:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \psi_s \,.\,,\; v_{ds} = R_s i_{ds} \tag{25}$$

Neglecting stator resistance in the equation (25) will be simplified as follows:

$$v_{qs} = \omega_e \psi_s \,.\,,\; v_{ds} = 0 \tag{26}$$

Substituting the equation (26) in the equations (14) and (15) we have:

$$P_s = -\frac{3}{2}\frac{L_m \omega_e \psi_s}{L_s} i_{qr} \,.\,, \tag{27}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\frac{\omega_s \psi_s^2}{L_s} - \frac{3}{2}\frac{\omega_s \psi_s L_m}{L_s} i_{dr} \,. \tag{28}$$

And therefore, the above equations show that the active and reactive powers of the stator can be controlled independently by the i_{qr} and i_{dr} components respectively.

The torque and power developed by the turbine can be computed based on the behavior of the power coefficient and the torque coefficient with respect to the flow coefficient [7]. These are the characteristic curves of the turbine under study and their shape may be seen on figures 3 and 4.

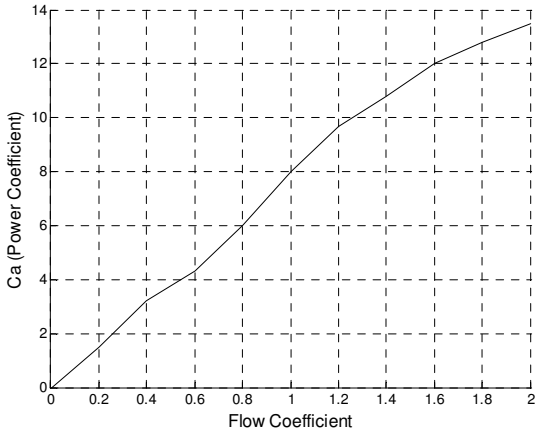


Fig. 3. Power Coefficient vs flow coefficient

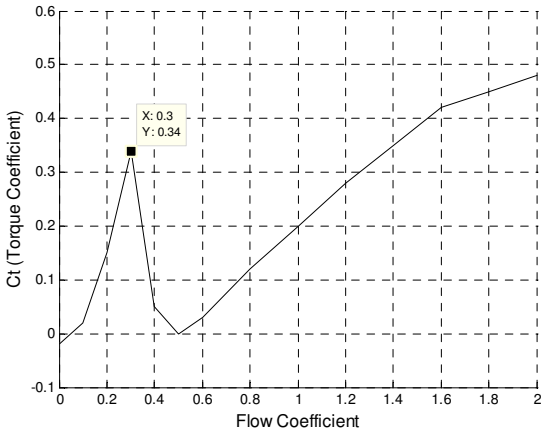


Fig. 4. Torque Coefficient vs flow coefficient

3 STALLING BEHAVIOUR

From the equation (6), it may be observed that when the air-flow velocity increases, the flow coefficient also increases provoking the so-called stalling behavior in the turbine. This behavior is also clearly observable in Fig. 4 when ϕ approaches 0.3. This value may change depending on the characteristic curve of each turbine.

In order to model the waves, it is necessary to take into account the spectrum of the wave climate, which indicates the amount of wave energy at different wave frequencies. Considering this data and the value T = 10s [8] for the standard input pressure drop in our case, the turbine input may be experimentally modelled as $\left|7000\sin(0.1\pi t)\right|$ Pa, as it may be seen in Fig. 5. With this input, the variation of the flow coefficient for the uncontrolled system may be seen in Fig. 6. It can be observed that its value is higher than 0.3, which corresponds to the stalling behavior threshold value for our turbine. In this sense, figures 7 and 8 show the power extracted from the turbine and generator respectively. As indicated before, it may be clearly observed that the power to be extracted by the turbine and generator is limited by its stalling behavior.

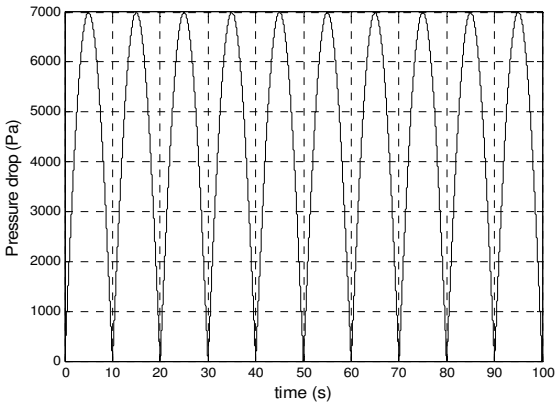


Fig. 5. dP=|7000sin(0.1πt)| Pa

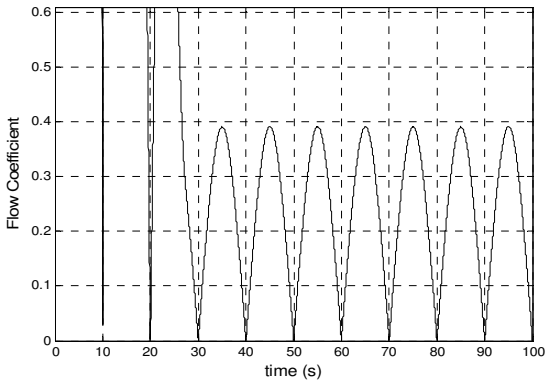


Fig. 6. Flow Coefficient vs time for dP=|7000sin(0.1πt)| Pa

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

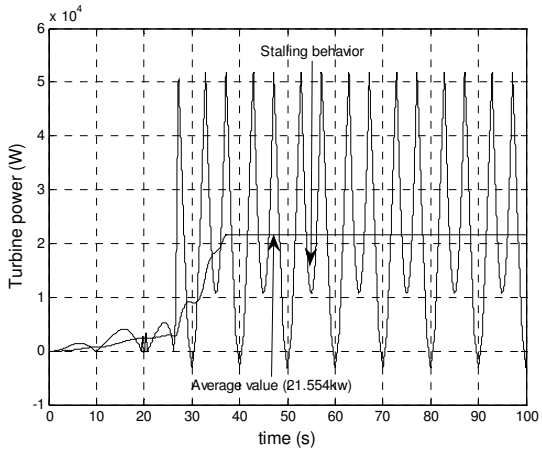


Fig. 7. Pt vs time for dP=|7000sin(0.1πt)| Pa

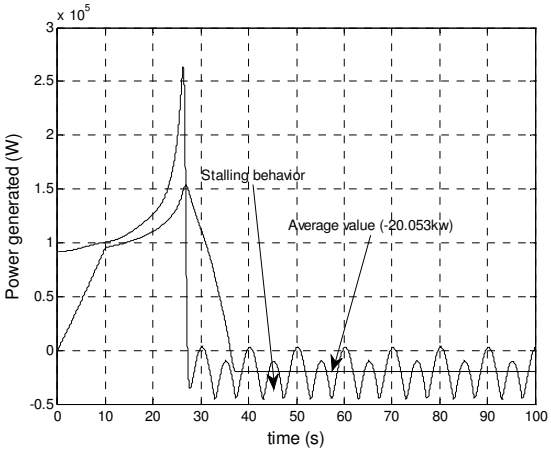


Fig. 8. Pg vs time for dP=|7000sin(0.1πt)| Pa

4 CONTROL STRATEGY

As it has been indicated, the undesired stalling behavior can be avoided if the turbine accelerates fast enough in response to the incoming airflow, which can be accomplished by increasing the permissible slip of the generator, allowing the system to reach higher speeds [9]. This speed control may be performed by using different kinds of controllers. Here will be presented the neural

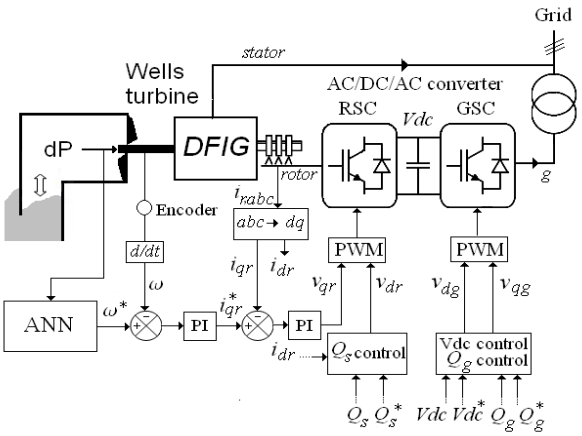


Fig. 9. Neural speed control scheme

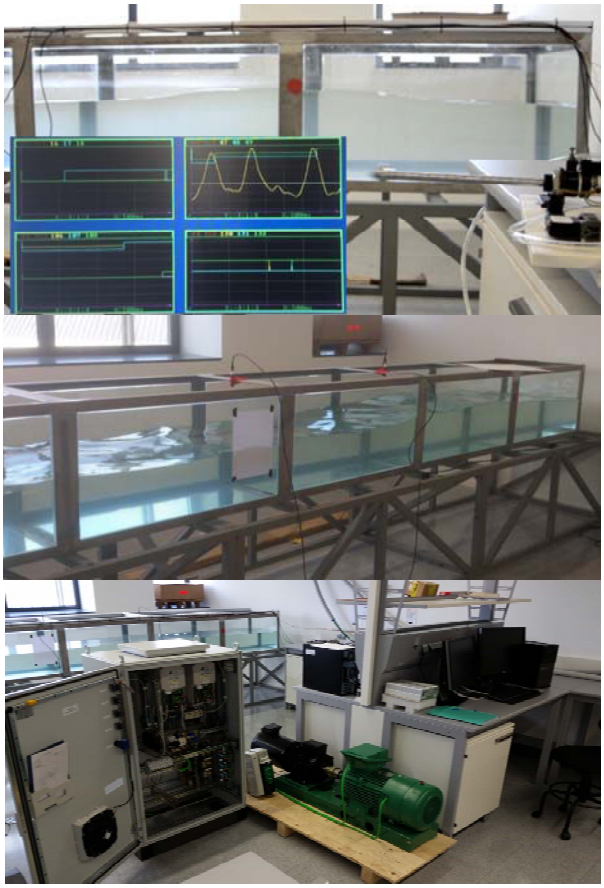


Fig. 10. Wave tank and test benchs at ACG lab

rotational speed control strategy depicted in Fig. 9, but it has been also successfully implemented by means of SMC and predictive controllers in the test bench of the group composed by a small wave tank (5m) and a 5.5kW DFIG (see Fig. 10) [10].

It may be seen from the aforementioned figure 9 that the DFIG stator windings are connected directly to the grid while the rotor windings are connected to the back to back converter. The converter is composed of a GSC connected to the grid, and a RSC connected to the wound rotor windings. The RSC controls the active power (P_s) and reactive power (Q_s) of the DFIG independently, while the GSC controls the DC voltage and grid side reactive power. In this work the RSC is expected to achieve the following objective: to regulate the DFIG rotor speed for maximum wave power generation without stalling behavior in the Wells turbine. In order to achieve independent control of the stator active power P_s (by means of speed control) and reactive power Q_s (by means of rotor current regulation), the instantaneous three-phase rotor currents $i_{r,abc}$ are sampled and transformed to d-q components i_{qr} and i_{dr} in the stator-flux oriented reference frame. A detailed study about DFIG control devices by means of RSC and GSC has been conducted in [11, 12].

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Table 1: Flow coeff. vs pressure drop and slip

$dP=\|P_0 \sin(0.1\pi t)\|$ Pa P_0	ϕ	$slip_{AVER}$
0–5500	0 – 0.2987	-0.0056
5500–5790	0 – 0.2999	-0.0234
5790–5975	0 – 0.2995	-0.0413
5975–6175	0 – 0.2999	-0.0600
6175–6375	0 – 0.2995	-0.0790
6375–6600	0 – 0.2995	-0.0986
6600–6850	0 – 0.2999	-0.1194
6850–7100	0 – 0.2998	-0.1406
7100–7375	0 – 0.2998	-0.1628
7375–7670	0 – 0.2999	-0.1860

The purpose is to calculate the maximum pressure drop across the rotor of the turbine without stalling behavior. To do so, numerous simulations have been carried out in order to study the variation of the flow coefficient for different pressure drops and slip of the DFIG. Using these values, it is possible to derive an optimum range for the slip as a function of the pressure drop avoiding the stalling in the turbine. A summary of these values are shown in Table 1. In this work, various architectures of ANNs, considering three and four layers were tested. Also, different models were considered by varying the number of neurons of the hidden layers, aiming to achieve equilibrium between achieved accuracy and computational cost.

Figure 11 and Fig. 12 show the detailed of typical performance evolution curves corresponding to the training process of two representative net designs. It can be also observed that, although both ANNs adequately match the desired relationship between slip and *dP*, the accuracy of the networks highly depends on the complexity of the chosen design. Besides, the precision of the estimates also depend on the quality of the information used to train the network.

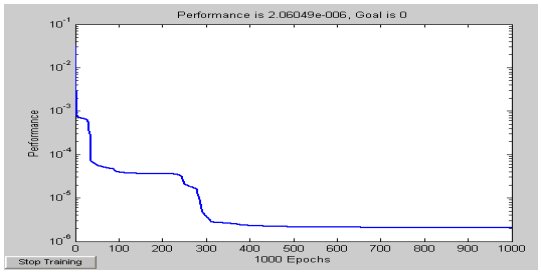


Fig.11.Training process performance for.ANN1: 1x4x1 (1000 epochs)

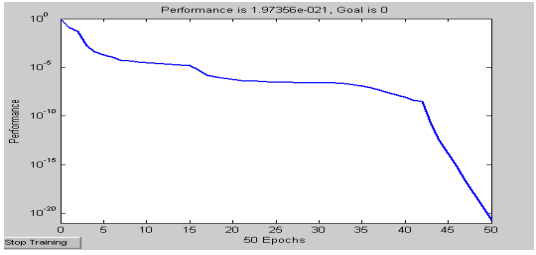


Fig.12.Training process performance for.ANN2: 1x16x16x1 (50 epochs)

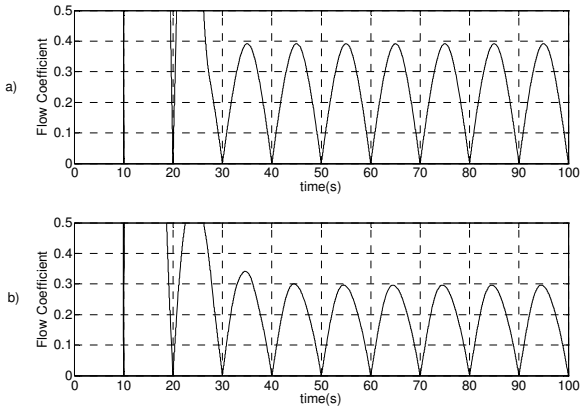


Fig. 13. Flow Coefficient vs time for $dP=|7000 \sin(0.1\pi t)|$ Pa a) Uncontrolled case b) Rotational Speed Control.

Table 2
Turbine and Generator parameters

Turbine	Generator
n=8	P=4
K=0.7079	Rs=0.0181
r=0.7285	Lls=0.13
a=1.1763	Lm=7.413
Patm=760	Rm=107.303
Tamb=30	Rr=0.0334
b=0.4	Llr=0.16

Following this procedure, an ANN with one hidden layer consisting of eight neurons has been chosen for our particular case since it presents an adequate performance to deal with the dynamics of the turbine generator module, and on the other hand, the use of more complex ANN designs does not report noticeable improvements.

5 RESULTS

In order to probe the performance and goodness of the proposed control scheme, a comparative study for both uncontrolled and controlled cases has been performed. Three different sea conditions have been considered; waves that do not cause the stalling behavior of the turbo-generator group, waves that cause the stalling behavior and irregular waves simulating a real sea state. The parameters of the turbine-generator module are shown in the Table 2.

The first case study considers waves producing pressure drop variations of $|7000\sin(0.1\pi t)|$ Pa, which produces the stalling behavior in the uncontrolled system. Fig. 13 shows the variation of the flow coefficient for this case. As it may be observed, the flow coefficient reaches the stalling threshold value, as shown in Fig. 13(a). In contrast, the rotational speed control avoids this stalling behavior, as shown in Fig. 13(b). As it may be seen, now the flow coefficient does not exceed the stalling threshold value 0.3.

The power generated by the turbine and induction generator is shown in Fig. 14 and Fig.15 respectively for the uncontrolled case (a) and rotational speed control (b). As shown in Fig 15(a), the average generated power in the uncontrolled case is 20.053Kw, while the power generated

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

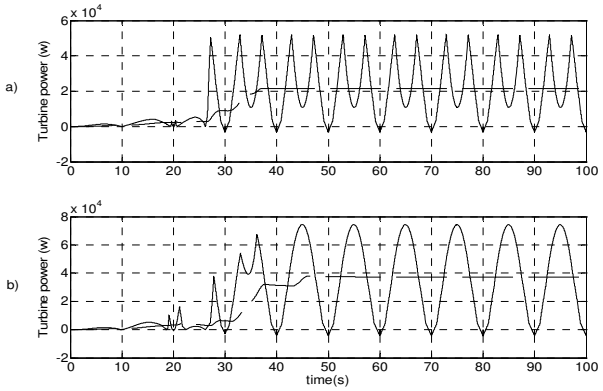


Fig. 14. Pt vs time for dP=|7000 sin(0.1πt)| Pa
a) Uncontrolled case b) Rotational Speed Control.

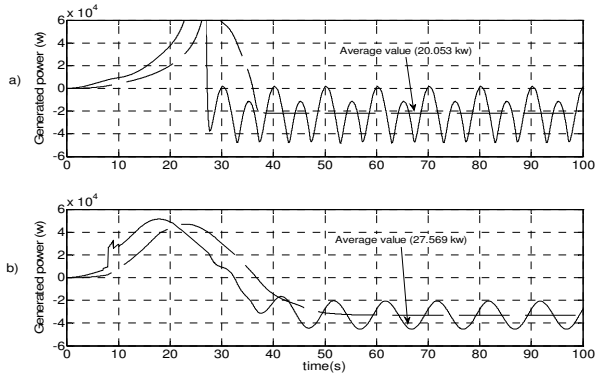


Fig. 15. Pg vs time for dP=|7000 sin(0.1πt)| Pa
a) Uncontrolled case b) Rotational Speed Control.

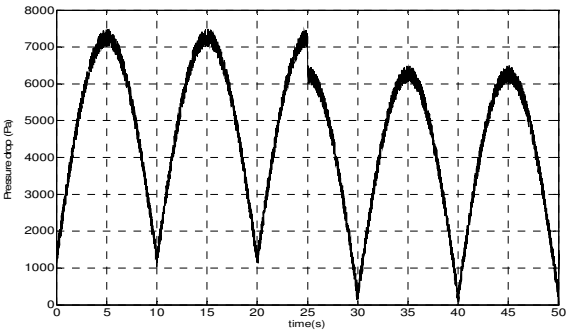


Fig. 16.Irregular waves generated in a realistic sea scenario

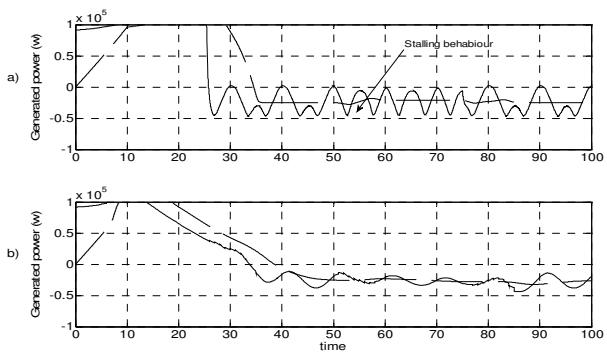


Fig. 17. Pg vs time for irregular wave
a) Uncontrolled case b) Rotational Speed Control.

Table 3
Turbine and Generator efficiency vs pressure drop

$dP=\|P_0 \sin(0.1\pi t)\|$ P_0 (Pa)	(a) $P_{generator}$ (Kw)	(b) $P_{generator}$ (Kw)
4000	**11.920**	**11.920**
5000	**20.060**	**20.060**
6000	**25.202**	**25.570**
7000	**20.053**	**27.569**
8000	**15.012**	**29.480**
Irregular wave	**22.942**	**27.036**

increases up to 27.569Kw, as shown in Fig. 15(b). This represents an increment on the generated power due to its stabilization by totally eliminating the losses associated with stalling behavior.

The second case study considers a realistic scenario with irregular waves, which produces changes in the pressure drop input to the turbine as shown in Fig. 16. In this case the average power of the generator fed into the grid is significantly higher in the controlled cases than in the uncontrolled one as shown the Fig. 17. In the uncontrolled case, the turbine reaches repeatedly the stalling threshold value, generating an average power of 22.942Kw, as shown in Fig. 17(a). In contrast, the controlled average generated power, using rotational speed control, is increased up to 27.036Kw, as shown in Fig. 17(b).

Table 3 shows a summary of the average powers delivered by the generator for different pressure drop inputs for both uncontrolled case (a) and rotational speed control (b) cases.

6 CONCLUSIONS

A output power control strategy of an OWC-Wells turbine-generator module has been presented in order to improve the stalling behavior in the Wells turbine, the most popular air turbine in wave energy applications, which is particularly sensitive to the airflow rate due to its drastic efficiency drop when this airflow rate exceeds a critical value depending on the turbine's rotational speed.

The control system appropriately adapts the slip of the induction generator according to the pressure drop entry maximizing the generated power. To do so, the rotor side converter is used as control actuator to regulate the doubly fed induction generator rotor speed for obtaining the maximum wave power generation allowed by means of the controller without entering in stalling behaviour.

Acknowledgement

This work was supported in part by the University of the Basque Country (UPV/EHU) through Research Project GIU11/02 and the Research and Training Unit UFI11/07, by the Ministry of Science and Innovation (MICINN) with Research Project ENE2010-18345, by the Basque Government through S-PE13UN042 and by

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

the Euregion Aquitaine-Euskadi through Project 2013/GR1/11.
The authors would also like to thank the collaboration of the Basque Energy Board (Ente Vasco de Energía - EVE) through Agreement UPV/EHUEVE23/6/2011 and the Spanish National Fusion Laboratory (CIEMAT) UPV/EHUCIEMAT08/190.

References

[1] Basque Energy Board (EVE): http://www2.eve.es/web/Energias-Renovables/Energia-marina.aspx

[2] Y. Torre-Enciso "Mutriku Wave Power Plant: From Conception to Reality", European Federation of Regional Energy and Environment Agencies (FEDARENE) [Online]. Dec. 2009. Available: http://www.fedarene.org/documents/projects/Nereida/Document/01_Mutriku-OWC_plant.pdf

[3] A. Chadwick, J Morfett, M. Borthwick. (2004): Hydraulics in civil and environmental engineering. Taylor& Francis Group, London, 2004.

[4] K. Thiruvenkatasamy, S. Neelamani. (1997): On the efficiency of wave energy caissons in array. Appl Ocean Res., 19 (1):61–72.

[6] R. Pena, J.C. Clare, G.M. Asher, L.M.C. Gato. (1996): Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converter and its application to variable-speed wind-energy generation. IEE Proc Electric Power Appl, 143, pages 231–241.

[6] M. Amundarain, M. Alberdi, Aitor J. Garrido, I. Garrido, "Modeling and simulation of wave energy generation plants: Output power control". IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 58, No. 1, pages: 105-117. 2011

[7] T. Setoguchi, K. Kaneko, H. Tanisyama, H. Maeda, M. Inoue. (1996): Impulse Turbine with self pitch controlled guide vanes connected by links. Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 6, no. 1, Mar.

[8] W.K. Tease, J. Lees, A. Hall. (2007): Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development. Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Portugal.

[9] V. Jayashankar, K. Udayakumar, B. Karthikeyan, K. Manivannan, Niranjan Venkatraman, S. Rangaprasad. (2000): Maximizing Power Output From A Wave Energy Plant. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 3, pp. 1796–1801.

[10] Aitor J. Garrido; I. Garrido, M. Amundarain; M. Alberdi, M. De la Sen "Sliding-Mode Control of Wave Power Generation Plants". doi:10.1109/TIA.2012.2227096. ISSN: 0093-9994. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. Vol. 48, No. 6, pages: 2372-2381. 2012

[11] J. Arbi, M.J.B. Ghorbal, I. Slama-Belkhodja, L. Charaabi. (2009): Direct Virtual Torque Control for Doubly Fed Induction Generator Grid Connection. IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, no. 10, pp. 4163–4173.

[12] W. Qiao, G.K. Venayagamoorthy, R.G. Harley. (2009): Real-Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped With Doubly Fed Induction Generators. IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 45, no. 1, pp. 98–107.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MODELADO MULTIBODY Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO

Sara Mata, Asier Zubizarreta, Charles Pinto, Javier Corral e Itziar Cabanes
Universidad del País Vasco (UPV\EHU)

Resumen

El sector automovilistico ha empleado de forma extendida el modelado y simulación de vehículos para la validación de nuevos sistemas, lo que le permite verificar en poco tiempo y a bajo coste sus nuevos diseños. Para dicho fin, el modelo de vehículo más usado es el denominado Multibody, donde el modelo del vehículo se divide en componentes más pequeños que se modelan mediante leyes físicas. En el presente trabajo se desarrolla y valida un modelo Multibody para el estudio de la dinámica de vehículos.

Palabras clave: Vehículo, Modelado, Multibody.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el campo del modelado y simulación de la dinámica de vehículos se ha empleado de forma extendida en la industria automovilística. A raíz de la mejora tecnológica, la potencia de cálculo de los ordenadores se ha incrementado de forma notoria, lo que también ha potenciado el uso de la simulación para la validación, de forma rápida y menos costosa de nuevos diseños, de un sector en constante desarrollo e innovación como es el de la automoción. Es por eso, que hoy en día está extendido el uso del denominado hardware-in-the-loop. [14].

La tendencia en el modelado en este campo es el uso de los modelos multibody (MB). En la dinámica de vehículos, estos modelos representan a cada cada componente individual del vehículo basadose en sus propiedades físicas e interconectándolas para obtener así un modelo del vehículo completo. Como consecuencia, estos modelos pueden obtener un alto grado de complejidad y precisión, lo que va ligado con un mayor coste computacional, por lo que debe existir un compromiso entre ambos aspectos. Un ejemplo de complejidad viene dado poer el trabajo de S. Hegazy que presenta un modelo con 94 grados de libertad [8].

Tradicionalmente, debido principalmente a la complejidad del estucio dinámico, los modelos de vehículos consideraban grandes simplificaciones y aproximaciones. De este modo, el modelo más empleado en la literatura es el denominado modelo bicicleta [1, 7, 12], donde sólo se consideran tres grados de libertad y no soporta grandes variaciones de sus variables. El desarrollo tecnológico impulsó el uso de modelados más mucho complejos y sin tantas simplificaciones como los elementos finitos o los ya mencionados modelos. En la industria automovilística, en las últimas décadas son los modelos MB los que han ganado en popularidad a a los elementos finitos debido, entre otras razones, a su modularidad y versatilidad [3].

Los modelos MB pueden ser desarrollados mediante herramientas y métodos de desarrollo propio que garantizan eficiencia y adaptabilidad o mediante herramientas comerciales de simulación, con cualquier grado de complejidad, como son CarSim, MSC ADAMS o VeDYNA [5, 11, 6].

En el presente trabajo se desarrolla un modelo multibody, constituido por los modelos de suspensión, neumáticos y chasis, para la simulación de vehículos. En el Apartado 2 se introducen unas consideraciones para poder describir correctamente el modelo desarrollado en el Apartado 3. Este modelo se compone de los modelos correspondientes a los componentes de los neumáticos (Apartado 3.1), la suspensión (Apartado 3.2) y chasis (Apartado 3.3). En elApartado 4 se valida el modelo del vehículo contrastándolo contra el modelo del sofware proporcionado VeDYNA. Finalmente se resumen las conclusiones principales en el Apartado 5.

2. CONSIDERACIONES PREVIAS

Previo al estudio de la dinámica de vehículos es necesario plantear una serie de aspectos importantes. El vehículo,considerado un sólido rígido al que están unidas cuatro ruedas y siendo el eje delantero el que gira solidario a la dirección, presenta un movimiento de seis grados de libertad. Así, el eje x es la dirección longitudinal, el eje y la dirección lateral, el eje z la dirección vertical y los giros *roll* (φ), *pitch* (χ) y *yaw* (ψ), alrededor de los tres ejes respectivamente (Figura 1). En esta aproximación

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

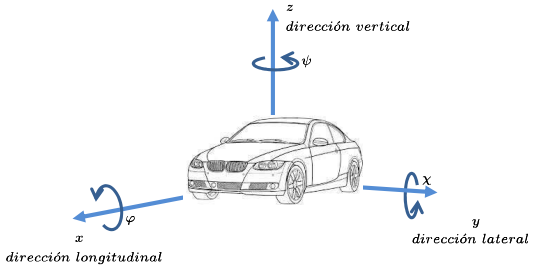


Figura 1: Movimientos del vehículo

no se considera el efecto de la aerodinámica del vehículo ni los desniveles en la calzada.

Una vez presentado el vehículo, se plantean los sistemas de coordenadas asociados a éste.

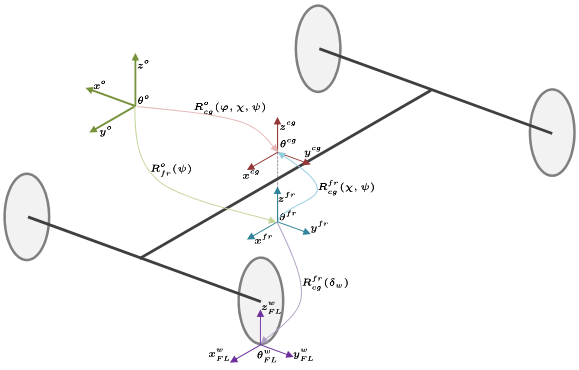


Figura 2: Sistemas de coordenadas y matrices de rotación

- O^o: Sistema de coordenadas inercial, fijo en un punto en la carretera, y respecto al cual se referencia el movimiento del vehículo
- O^{cg}: Sistema de coordenadas del vehículo con origen en su centro de gravedad.
- O^{fr}: Sistema de coordenadas asociado al bastidor (frame) del vehículo. El origen de este sistema coincide en el plano horizontal con el centro de gravedad pero está a nivel de la calzada. En este sistema de coordenadas sólo es considerado el problema planar, esto es, la variación del vehículo respecto del sistema inercial (O^o) en la dirección lateral, longitudinal y el giro alrededor del eje z. Por consiguiente, este sistema de coordenadas difiere del sistema de coordenadas del centro de gravedad (O^{cg}) en los giros alrededor del eje x (φ) y del eje y (χ).
- O^w_{ij}: Sistemas de coordenadas asociados a las ruedas (wheel) del vehículo, donde cada rueda tiene un sistema de coordenadas propio. El origen de cada sistema se situa en el centro de la huella del neumático, el punto de contacto entre el neumático y la carretera. Dado que cada rueda tiene su propio sistema de coordenadas, en las ruedas delanteras el eje x^w_{ij} y el eje y^w_{ij} varían en función del ángulo de giro de la dirección (δ_w).

A excepción del sistema de coordenadas fijo en el suelo, los otros sistemas de coordenadas se mueven con el vehículo.

2.1. Cambios de orientación entre sistemas de coordenadas

Conocidos los sistemas de coordenadas del vehículo es preciso establecer las matrices de transformación para relacionar los vectores entre los diferentes sistemas, tal y como se muestra en la Figura 2.

En primer lugar, es preciso relacionar, mediante los ángulos de Euler, la orientación del sistema de coordenadas fijo (O^o) con el sistema de coordenadas del centro de gravedad (O^{cg}) a través de la matriz de rotación $\mathbf{R^o_{cg}}(\varphi, \chi, \psi)$. Esta matriz, según la Ecuación (1) se calcula mediante la multiplicación de las matrices de rotación que relacionan el sistema de coordenadas fijo (O^o) con el del bastidor (O^{fr}), y el sistema de coordenadas del bastidor (O^{fr}) con el del centro de gravedad (O^{cg}).

$$\mathbf{R^o_{cg}}(\varphi, \chi, \psi) = \mathbf{R^o_{fr}}(\psi)\, \mathbf{R^{fr}_{cg}}(\varphi, \chi) \tag{1}$$

En el primer caso se trata de la matriz $\mathbf{R^o_{fr}}(\psi)$, que consiste en una rotación alrededor del eje z, ya que se ha mencionado previamente, se toma la consideración $z^o = z^{fr}$

$$\mathbf{R^o_{fr}}(\psi) = \mathbf{R_z}(\psi) \tag{2}$$

El segundo caso se trata de la matriz $\mathbf{R^{fr}_{cg}}(\varphi, \chi)$, que muestra la rotación alrededor del eje x (roll) y del eje y (pitch).

$$\mathbf{R^{fr}_{cg}}(\varphi, \chi) = \mathbf{R_y}(\chi)\, \mathbf{R_x}(\varphi) \tag{3}$$

Por último, la matriz de rotación que relaciona el sistema de coordenadas del bastidor (O^{fr}) con el de las ruedas delanteras (O^w) a través del ángulo de giro de la dirección (δ_w), también se trata de una matriz de rotación alrededor del eje z (yaw).

$$\mathbf{R^{fr}_w}(\delta_w) = \mathbf{R_z}(\delta_w) \tag{4}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

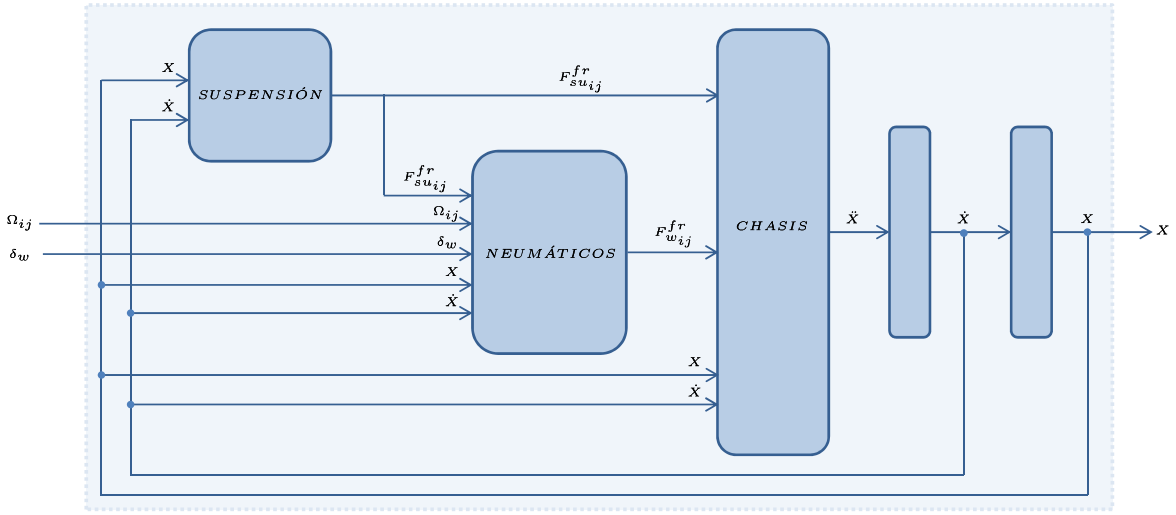


Figura 3: Modelo del vehículo con sus correspondientes subsistemas

3. MODELO DE VEHÍCULO

El modelo de vehículo MB considerado en el presente trabajo se ilustra en la Figura 3, donde se plantean los submodelos fundamentales de los neumáticos, la suspensión y el chasis. Dado el modelo planteado, se plantea el estudio de la dinámica como la división del cálculo de las fuerzas verticales mediante el modelo de suspensión, el cálculo de las fuerzas horizontales mediante el modelo de neumáticos y el efecto de tanto las fuerzas horizontales como en las verticales en el chasis del vehículo. El efecto de dichas fuerzas supone una variación de la posición y orientación del vehículo.

De este modo, se consideran como variables de entrada del modelo del vehículo las velocidades angulares a la que giran las ruedas (Ω_{ij}) y el ángulo de giro de las ruedas (δ_w) y como variable de salida el vector de posición y orientación del vehículo ($\mathbf{X} = [x \quad y \quad z \quad \varphi \quad \chi \quad \psi]^T$) definido respecto del sistema de coordenadas fijo. Este vector, así como su derivada, es necesario realimentarlo a todos los subsistemas para definir la posición y velocidad del vehículo en cada instante.

Para el modelo de suspensión se han considerado cuatro unidades de suspensión independientes para cada rueda del vehículo, de forma que el modelo se emplea para el cálculo de las fuerzas verticales que se producen en cada vértice (se ha considerado un modelo de suspensión puramente vertical) [3]. Este modelo calcula en función de la posición y velocidad del chasis el efecto de la suspensión en el neumático ($F^{fr}_{z_{ij}}$) así como en el propio chasis ($F^{fr}_{zs_{ij}}$). Estas dos fuerzas se recogen en el vector $\mathbf{F^{fr}_{su_{ij}}} = [F^{fr}_{z_{ij}} \quad F_{z_{ij}}]^T$.

El modelo de neumáticos consiste en el estudio planar, en el cálculo de las fuerzas horizontales que afectan al vehículo y se emplea el modelo de Pacejka *Magic Formula* [13], por su simplicidad y buenos resultados. Para este modelo, además de la posición y velocidad del vehículo, se precisa conocer la fuerza vertical ejercida en los neumáticos ($F^{fr}_{z_{ij}}$), y expresada en el vector $\mathbf{F^{fr}_{su_{ij}}}$, así como las velocidades angulares a la que giran las ruedas (Ω_{ij}) y el ángulo de giro de las ruedas (δ_w). Las salidas del modelo, las fuerzas calculadas, se corresponden con la fuerza longitudinal ($F^{fr}_{x_{ij}}$), la fuerza lateral ($F^{fr}_{y_{ij}}$) y la fuerza de rodadura ($F^{fr}_{R_{ij}}$), la fuerza que se opone al movimiento del neumático. Estas tres fuerzas se recogen en el vector $\mathbf{F^{fr}_{w_{ij}}} = [F^{fr}_{x_{ij}} \quad F^{fr}_{y_{ij}} \quad F^{fr}_{R_{ij}}]^T$.

Finalmente, mediante el modelo del chasis, se estudia el efecto de las fuerzas verticales de la suspensión ($\mathbf{F_{su_{ij}}}$) y de las fuerzas horizontales de los neumáticos ($\mathbf{F^{fr}_{w_{ij}}}$) en el chasis en el vehículo o chasis. Estas fuerzas generan desplazamientos y rotaciones en el vehículo, que como ya se ha mencionado previamente, se representan respecto al sistema de referencia fijo y se recogen en el vector $\mathbf{X} = [x \quad y \quad z \quad \psi \quad \chi \quad \varphi]^T$.

3.1. NEUMÁTICOS

El modelado de los neumáticos es la parte más crítica en el proceso de modelado de un vehículo, ya que al ser el único elemento en contacto con el terreno, las fuerzas horizontales y momentos generados en los neumáticos afectan de forma significativa el comportamiento del vehículo [12]. Además de estas fuerzas, los neumáticos tienen que soportar el peso del vehículo así como fuerzas adicionales debidas a la carga aerodinámica o

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la transferencia de masas durante el frenado o giro. Como consecuencia, el neumático demanda un precio en modo de resistencia a la rodadura.

El modelado de los neumáticos es muy complejo de realizar debido a que los neumáticos son un compuesto complejo que comprende muchas capas de diferentes materiales. Los métodos basados en datos experimentales son los más utilizados debido a sus buenos resultados con un bajo coste computacional, entre los que destaca el utilizado en este trabajo, el modelo de Pacejka. Este modelo consiste en un conjunto de fórmulas que interpolan los datos de las medidas de los neumáticos para relacionar la fuerza longitudinal (F_x), la fuerza lateral (F_y) y el momento de alineación (M_z) con el ángulo de deriva (α) y el ratio de deriva (κ) de los neumáticos, variables que será preciso calcular en el modelado del neumático. El mayor inconveniente de este método es la dificultad que conlleva obtener los coeficientes relacionados con el modelo de neumático, aunque hoy en día se pueden calcular mediante diversos programas de simulación de dinámica de vehículos.

Con el fin de definir el modelo, en primer lugar se definen, en el plano horizontal, los centros de rotación de las ruedas (Q_{ij}) respecto al origen del sistema de coordenadas del bastidor mediante los vectores de posición $\mathbf{q_{ij}^{fr}}$ (Ecuación (5)). En la Figura 4 se detallan las dimensiones del vehículo donde l_F es la distancia desde el centro de gravedad al eje delantero, l_R la distancia entre el centro de gravedad al eje trasero y b_F y b_R son la vía del eje delantero y del trasero respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathbf{q_{FL}^{fr}} &= [l_F \quad b_F/2 \quad 0]^T \\ \mathbf{q_{FR}^{fr}} &= [l_F \quad -b_F/2 \quad 0]^T \\ \mathbf{q_{RL}^{fr}} &= [-l_R \quad b_R/2 \quad 0]^T \\ \mathbf{q_{RR}^{fr}} &= [-l_R \quad -b_R/2 \quad 0]^T \end{aligned} \tag{5}$$

A continuación se definen los vectores de velocidad equivalente en los centros de rotación de las ruedas ($\mathbf{V_{w_{ij}}^{fr}}$). Éstos, según la Ecuación (6), se definen como la superposición de la velocidad longitudinal y lateral a la que viaja el vehículo y la velocidad angular alrededor del eje z. La velocidad lineal es necesario multiplicarla por la matriz $R_o^{fr}(\psi)$, para representarla en el sistema de coordenadas del bastidor (O^{fr}). La velocidad angular, en cambio, coincide con la derivada del ángulo de euler ($\omega_z = \dot{\psi}$) ya que no se consideran desniveles en la carretera.

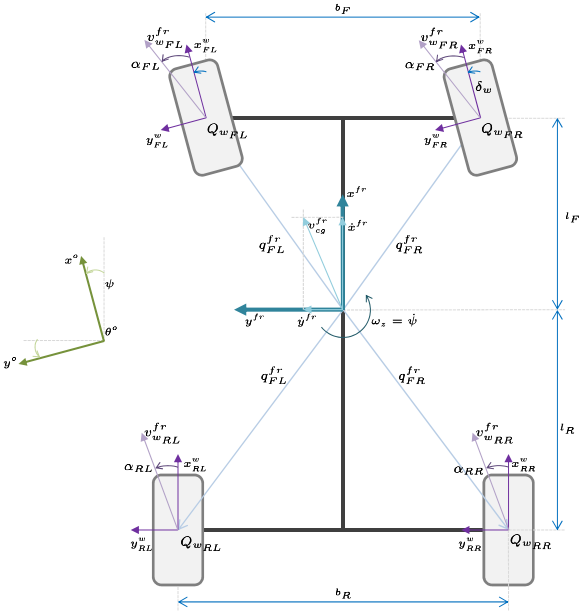


Figura 4: Definición de la velocidad equivalente en el centro de rotación de las ruedas

$$\mathbf{V_{w_{ij}}^{fr}} = R_o^{fr}(\psi) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \mathbf{q_{ij}^{fr}} \tag{6}$$

Una vez conocida la velocidad $\mathbf{V_{w_{ij}}^{fr}}$ se puede proceder a calcular el ángulo de deriva del neumático (α_{ij}) y el ratio de deriva (κij) del mismo. El primero es el ángulo formado por la dirección en la que apunta la rueda y aquélla en la que verdaderamente se está desplazando, esto es, el ángulo entre la velocidad equivalente de la rueda ($\mathbf{V_{w_{ij}}^{fr}}$) y la dirección del sistema de coordenadas del neumático (x^w). La deriva debe calcularse con precisión debido al alto grado de cohesión existente entre ésta y las fuerzas laterales de los neumáticos.

A partir de $\mathbf{V_{w_{ij}}^{fr}}$ y considerando que está referenciada respecto al sistema de coordenadas del bastidor, el ángulo de deriva para los neumáticos delanteros y traseros se calcula de la siguiente forma.

$$\alpha_{Fj} = \delta_w - \arctan\left(-\frac{V_{w_{Fj}}^{fr}(y)}{V_{w_{Fj}}^{fr}(x)}\right) \tag{7}$$

$$\alpha_{Rj} = \arctan\left(-\frac{V_{w_{Rj}}^{fr}(y)}{V_{w_{Rj}}^{fr}(x)}\right) \tag{8}$$

Por su parte, el ratio de deriva (κ_{ij}), según la definición de Pacejka [13], se denomina al ratio entre

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la componente x del vector de la velocidad equivalente del centro de rotación de la rueda ($V_{w_{ij}}^{fr}(x)$) y la velocidad angular que tiene la misma (Ω_{ij}). La velocidad angular Ω_{ij} se multiplica por el radio efectivo del neumático ($r_{e_{ij}}$), que es el radio del neumático cuando gira libremente.

$$\kappa = -\frac{V_{w_i j}(x) - r_e \Omega_{ij}}{V_{w_i j}(x)} \tag{9}$$

Conocidos el ángulo de deriva (Ω_{ij}), el ratio de deriva (κ_{ij}) y la carga que soportan los neumáticos ($F_{z_{ij}}$), se pueden calcular las fuerzas horizontales de los neumáticos mediante las ecuaciones del Pacejka.

Por último, es necesario rotar las fuerzas horizontales de los neumáticos delanteros el ángulo de giro δ_w alrededor del eje z, ya que las fuerzas se han calculado en el sistema de referencia de cada neumático (O_{ij}^{w})y es preciso representarlas en el sistema de coordenadas del bastidor (O^{fr}).

$$\begin{bmatrix} F_{x_{ij}}^{fr} \\ F_{y_{ij}}^{fr} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R_w^{fr}}(\delta_w) \begin{bmatrix} F_{x_{ij}}^{w} \\ F_{y_{ij}}^{w} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Por otro lado, también es preciso definir la fuerza de resistencia a la rodadura ($F_{R_{ij}}^{fr}$), que es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo por efecto de la plasticidad de los neumáticos y es otra fuerza que debe considerarse al modelar un vehículo. Experimentalmente se ha demostrado que esta fuerza es proporcional a la fuerza normal de las ruedas y que el coeficiente que multiplica la fuerza normal, el coeficiente de rodadura (f_r), depende de varios factores, entre los que destaca la velocidad del vehículo, presión de inflado, ángulo de deriva y ángulo camber, entre otros. [4].

$$F_{R_{ij}}^{fr} = f_r \, F_{z_{ij}}^{fr} \tag{11}$$

3.2. SUSPENSIÓN

El modelo de suspensión empleado considera una unidad de suspensión independiente (Figura 5) en cada rueda pero estando las cuatro suspensiones unidas por el vehículo [9]. De esta forma, se calcula cada fuerza de reacción del vehículo en los neumáticos ($F_{z_{ij}}^{fr}$) así como las fuerzas de reacción de la suspensión en el el chasis ($F_{zs_{ij}}^{fr}$) de forma separada. La variación de estas fuerzas se debe a la transferencia de masas que se produce en el vehículo al variar la rotación del chasis, por ejemplo al girar.

Para este fin, se definen las siguientes fuerzas en el modelo, tal y como se muestra en la Figura 5. La fuerza $F_{K_{s_{ij}}}$ se genera en el muelle con rigidez $K_{s_{ij}}$, la fuerza $F_{B_{s_{ij}}}$ es efecto del amortiguador con constante de amortiguación $B_{s_{ij}}$ y la fuerza $F_{K_{u_{ij}}}$ se produce en el muelle con rigidez $K_{u_{ij}}$. Para el cálculo de las fuerzas en los muelles, es necesario conocer cuánto está comprimido o traccionado el muelle y en los amortiguadores la velocidad de dicha compresión o tracción. Para ello, se calculan los desplazamientos de la masa suspendida (dzs_{ij}) y de la masa no suspendida (dzu_{ij}) para cada vértice.

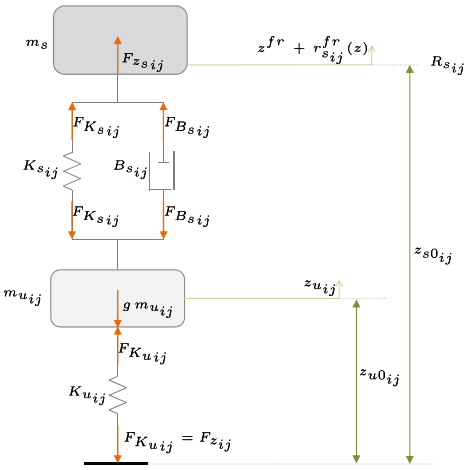


Figura 5: Modelo suspensión del vehículo completo

Nuevamente, para plantear el modelo, en primer lugar es necesario plantear los vectores de posición $r_{s_{ij}}^{cg}$ para cada vértice $R_{s_{ij}}$ respecto del sistema de coordenadas del centro de gravedad, para posteriormente poder calcular el desplazamiento que se produce. Se considera que los puntos $R_{s_{ij}}$ están a la misma altura que el centro de gravedad, por lo que

$$\mathbf{r_{ij}^{cg}} = \mathbf{q_{ij}^{fr}} \tag{12}$$

Pero, para conocer el efecto de los giros alrededor del eje x y del eje y del sistema de coordenadas del centro de gravedad es necesario resolver la Ecuación (13).

$$\mathbf{r_{s_{ij}}^{o}} = \mathbf{R_{cg}^{o}} \, \mathbf{r_{s_{ij}}^{cg}} \tag{13}$$

El desplazamiento de la masa no suspendida (dzu) se plantea como la diferencia entre la altura de la masa no suspendida en el instante actual (zu) y la altura de la masa no suspendida en el estado de reposo ($zu0$). Por su parte, el desplazamiento de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la masa suspendida (dzs) se define como la diferencia entre la altura del centro de gravedad (z) más el desplazamiento debido a los giros del chasis ($r^o_{s_{ij}}(z)$) y la altura del centro de gravedad en estado de reposo ($zs0$).

$$dzu = zu - zu0 \tag{14}$$

$$dzs = z + r^o_{s_{ij}}(z) - zs0 \tag{15}$$

Aplicando la Ley de Newton ($m\,a = \sum F$) en la masa no suspendida $m_{u_{ij}}$ y suponiendo características lineales en los muelles y el amortiguador, de este modelo se obtiene la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} m_{u_{ij}}\ddot{z}_{u_{ij}} =& - m_{u_{ij}}g + F_{K_{u_{ij}}} - F_{K_{s_{ij}}} - F_{B_{s_{ij}}} \\ =& - m_{u_{ij}}g + K_{u_{ij}}(dz_{r_{ij}} - dz_{u_{ij}}) \\ & - K_{s_{ij}}(dz_{u_{ij}} - dz_{s_{ij}}) \\ & - B_{s_{ij}}(\dot{z}_{u_{ij}} - (\dot{z} + \dot{r}^o_{s_{ij}}(z))) \end{aligned} \tag{16}$$

Por lo que la fuerza de reacción de la suspensión en el chasis es

$$\begin{aligned} F_{z_{s_{ij}}} =& F_{K_{s_{ij}}} + F_{B_{s_{ij}}} \\ & K_{s_{ij}}(dz_{u_{ij}} - dz_{s_{ij}}) \\ & + B_{s_{ij}}(\dot{z}_{u_{ij}} - (\dot{z} + \dot{r}^o_{s_{ij}}(z))) \end{aligned} \tag{17}$$

3.3. CHASIS

El chasis del vehículo se modela como un cuerpo rígido sobre el que se debe analizar el movimiento traslacional en las tres direcciones del sistema de coordendas del fijo (O^o) (x, y, z) y el movimiento rotario alrededor de esos tres ejes (φ, χ, ψ) y obtener así el vector de salida $\mathbf{X} = [x \quad y \quad z \quad \varphi \quad \chi \quad \psi]^T$. Estos movimientos se generan como consecuencia del efecto que producen en el chasis las fuerzas de los neumáticos ($F^{fr}_{x_{ij}}$, $F^{fr}_{y_{ij}}$) y la resistencia a la rodadura ($F^{fr}_{R_{ij}}$) y las fuerza de la suspensión ($F^{fr}_{zs_{ij}}$).

En primer lugar, para el cálculo de las aceleraciones lineales $\ddot{x}$, $\ddot{y}$ y $\ddot{z}$ se aplica la Segunda Ley de Newton ($m\,a = \sum F$). Las fuerzas se calculan el sistema de referencia del bastidor, pero el movimiento del vehículo se define respecto a un sistema de referencia fijo. Con el fin de obtener las aceleraciones lineales en este sistema de referencia, es necesario hacer la siguiente rotación.

$$F^o = \mathbf{R^o_{fr}}\, F^{fr} \tag{18}$$

En la ecuación de la Segunda Ley de Newton la masa y la aceleración son las del cuerpo donde se ejercen las fuerzas, es por ello que se debe hacer una distinción entre las fuerzas verticales ($F^o_{zs_{ij}}$) y las horizontales ($F^o_{x_{ij}}$, $F^o_{y_{ij}}$). Las fuerzas verticales de la suspensión se ejercen sólo sobre el chasis, por lo que la masa a considerar es la de la masa suspendida (m_s) y la aceleración que se calcula corresponde a la aceleración del chasis. En el caso de las fuerzas horizontales, éstas se ejercen sobre la masa no suspendida, por lo que se debe considerar la masa de todo el vehículo para el calculo (la masa total del vehículo es la suma de las masas no suspendidas ($m_{u_{ij}}$) y la masa suspendida (m_s) y que se denomina masa del centro de gravedad (m_{cg})). Las aceleraciones que se calculan mediante estas fuerzas son las aceleraciones del centro de gravedad.

$$m_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F^o_{zs_{ij}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_s\, g \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$m_{cg} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} F^o_{x_{ij}} \\ F^o_{y_{ij}} \\ 0 \end{bmatrix} - \sum \begin{bmatrix} F^o_{R_{ij}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

En segundo y último lugar, para el cálculo del desplazamiento angular, se aplica la Ley de Euler ($\mathbf{I_{GG}}\,\dot{\omega} = \sum \mathbf{M}$). Mediante esta ecuación, se obtienen las aceleraciones angulares del vehículo, mediante la matriz de inercia centroidal I_{GG} y los momentos que ejercen las fuerzas en el cuerpo.

Los momentos de fuerza se calculan como la multiplicación vectorial del vector posición y las fuerzas ($\mathbf{M_{ij}} = \mathbf{r^{cg}_{s_{ij}}} \times \mathbf{F^{cg}_{ij}}$). Estos momentos se deben calcular en el sistema de coordenadas del centro de gravedad, ya que es sobre el que se calculan los giros. Por lo tanto, los vectores de posición se corresponden con los recogidos en la Ecuación (12) y el vector de fuerzas $\mathbf{F^{cg}_{ij}}$ es el conjunto de fuerzas de los neumáticos y la suspensión rotado al sistema de referencia del centro de gravedad (O^{cg}).

$$\mathbf{F^{cg}_{ij}} = \mathbf{R^{cg}_{fr}} \begin{bmatrix} F^{fr}_{x_{ij}} - F^{fr}_{R_{ij}} \\ F^{fr}_{y_{ij}} \\ F^{fr}_{zs_{ij}} \end{bmatrix} \tag{21}$$

Por su parte, mediante la Ley de Euler descrita, se obtienen las aceleraciones angulares ($\dot{\omega}$) del vehículo, pero estas carecen de significado ya que el movimiento se representa respecto al sistema de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

coordenadas fijo (θo) y lo que se precisa son las segundas derivadas de los ángulos de Euler. Por lo tanto, es necesario plantear una relación entre las derivadas de los ángulos de Euler $[\dot{\psi} \quad \dot{\chi} \quad \dot{\varphi}]^T$ y la velocidad angular del sistema de referencia del centro de gravedad $[\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$.

Un método consiste en calcular la relación entre la velocidad angular del vehículo y las derivadas de los ángulos de Euler en base al cálculo de la velocidad angular del vehículo respecto al sistema de referencia asociado a él mismo $\omega_{\mathbf{p}}$ [2]. Dado que $\omega_{\mathbf{p}}$ es la proyección de ω en el sistema de referencia del vehículo, el cálculo se realiza en base a las sucesivas proyecciones que sufre el vector de velocidades y que dependen de los ángulos de Euler escogidos. De este modo, la velocidad angular del vehículo queda definido,

$$\begin{aligned}\omega_{\mathbf{p}} &= \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R_x}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\chi} \\ 0 \end{bmatrix} + (\mathbf{Ry}\ \mathbf{Rx})^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\chi) \\ 0 & \cos(\varphi) & \cos(\chi)\sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\chi)\cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{22}$$

En la Ecuación de la Ley de Euler se obtienen las aceleraciones angulares, por lo que es necesario calcular la derivada de la Ecuación (22).

$$\dot{\omega_{\mathbf{p}}} = \dot{\mathbf{E}} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\chi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \tag{23}$$

4. VALIDACIÓN

Con la finalidad de validar el diseño de propuesto, se ha desarrollado dicho modelo en el software matemático Matlab [10], mediante su toolbox Simulink. Para contrastar su validez, se ha empleado el software de simulación TESIS DYNAware [6], en concreto, de su plataforma veDYNA para la simulación en tiempo real de dinámica de vehículos. Para dicho fin, se han extraido los parámetros correspondientes al dimensionado del vehículo, suspensión y neumáticos del modelo de vehículo ejemplo que ofrece DYNAware, el *BMW_325i_88*. Los parámetros más significativos se recogen en la Tabla 4.

Parámetro	**Valor**
l_F	1,250 m
l_R	1,320 m
$b_F/2$	0,7025 m
$b_R/2$	0,6995 m
m_{cg}	1.296 kg
k_{s_F}	138.750 N/m
K_{s_R}	325.780 N/m
B_{s_F}	1166,9 N/(m/s)
B_{s_R}	1006,6 N/(m/s)

Cuadro 1: Parametros significativos del modelo

Con estos datos, se han realizado una serie de pruebas para verificar la dinámica longitudinal y lateral y comparar los resultados obtenidos tanto del modelo del presente trabajo con los obtenidos mediante el DYNAware.

La primera simulación verifica la dinámica longitudinal, ya que consiste en una aceleración en línea recta y una frenada. Como se puede observar en la Figura 6, tanto el desplazamiento del vehículo (distancia x, distancia y, distancia z) como su orientación (giro roll, giro pitch, giro yaw) tiene una gran similitud en ambos modelos.

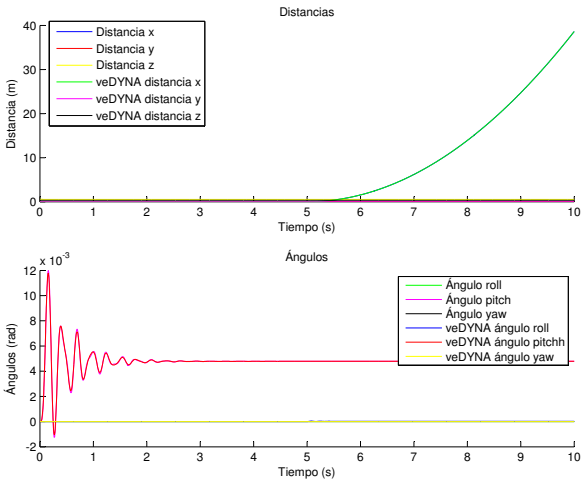


Figura 6: Dinámica longitudinal

La segunda simulación comprueba la dinámica lateral y consiste en realizar una circunferencia. En la Figura 7 se observa como las circunferencias formadas en ambas simulaciones son muy similares, siendo el color azul correspondiente al modelo del presente trabajo y el color rojo a la simulación del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

veDYNA.

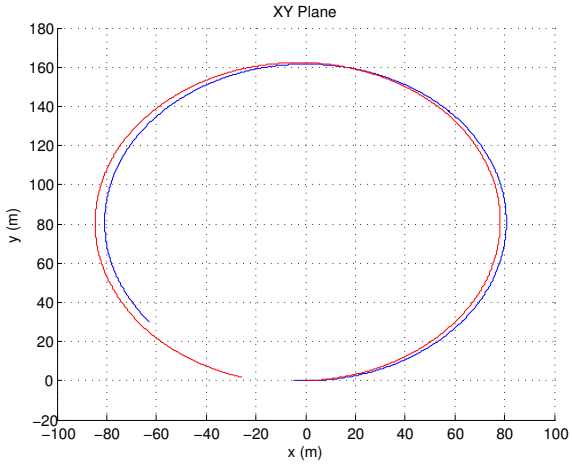


Figura 7: Dinámica lateral

5. CONCLUSIONES

En la industria automóvilista el modelado de vehículos mediante modelos MB ha ganado gran popularidad debido a la complejidad y modularidad que estos modelos conllevan. Estos modelos se desarrollan mediante el modelado de las diferentes partes de un vehículo, analizando sus desplazamientos y orientaciones por separado para conocer la dinámica del vehículo en su conjunto. En este trabajo se ha desarrollado un modelo MB compuesto por los subsistemas de los neumáticos, la suspensión y el chasis y se analizan los seis grados de libertad que presenta el vehículo, el desplazamiento lineal en los ejes x, y y z, así como su orientación roll, pitch y yaw. Finalmente se ha validado el modelo contrastando el modelo desarrollado en el software Matlab con el ejemplo ofertado en el software veDYNA, donde se observa que ambos modelos cumplen la misma trayectoria para una velocidad del vehículo y un giro de las ruedas determinado con bastante precisión. De este modo se ha obtenido un modelo preciso con un bajo coste computacional y gran modularidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Programa Predoctoral de Formación de Personal Investigador No Doctor BFI- 2012- 223 del Gobierno Vasco, el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO&FEDER en el marco del proyecto DPI- 2012-32882, así como por los proyectos IT719-13 del Gobierno Vasco y UFI11/28 de la UPV/EHU.

Referencias

[1] Abe, M., (2009) Vehicle handling dynamics. Elsevier.

[2] Bilbao, A., Amezua, E., Altuzarra, O., (2008) Mecánica Aplicada: Dinámica. Editorial Sintesis.

[3] Blundell, M., Damian, H., (2004) Multibody systems approach to vehicle dynamics. SAE.

[4] Bosch, (2004) Automotive Handbook, Bentley.

[5] CarSim, (2014) www.carsim.com

[6] DYNAware, (2014) www.tesis-dynaware.com/en.html

[7] Gillespie, T. D., (1992) Fundamentals of vehicle dynamics. SAE.

[8] Hegazy, S., Rahnejat, H., Hussain K. (2000) Multi-Body Dynamics in Full-Vehicle Handling Analysis under Transient Manoeuvre Vehicle System Dynamics Vol. 34, Iss. 1.

[9] Ikenaga, S., Lewis, F. L., Campos, J., and Davis, L., (2000) Active Suspension Control of Ground Vehicle based on a Full-Vehicle Model. Proceedings of the American Control Conference. Chicago, Illinois.

[10] Matlab, (2014) www.mathworks.es/products/matlab/

[11] MSC Adams, (2014) www.mscsoftware.com/product/adams

[12] Milliken, D.L., Milliken, W.F., (1995) Race Car Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers.

[13] Pacejka, H., (2012) Tire and Vehicle Dynamics, Elsevier.

[14] Romano, R., (2003) Real-Time Multi-Body Vehicle Dynamics Using A Modular Modeling Methology. Society of Automotive Engineers.

[15] Uwe Kiencke, U., Nielsen, L., (2005) Automotive Control Systems for Engine, Driveline, and Vehicle. Springer.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO NEUMATICO PARA REHABILITACION DE MANO MEDIANTE FUNDA TERMORETRACTIL.

Y. Narváez, O. A. Vivas, S. C. Enriquez
Universidad del Cauca, yalenan@unicauca.edu.co

J. M. Sabater-Navarro, N. García, A. Martínez
Universidad Miguel Hernández, j.sabater@umh.es.

Resumen

En este artículo se presenta el diseño y construcción de un dispositivo para rehabilitación de falanges que realiza la extensión pasiva de falanges de miembro superior en una persona con lesión motora debido a un lesión cerebrovascular. El accionamiento utilizado es de tipo neumático, formado por pequeño músculo neumático adaptable, de forma que se garantice la seguridad y un comportamiento compliance. Este accionamiento, además, permite la creación de diferentes secuencias de movimiento con los dedos, teniendo así como característica adicional la modularidad puesto que estos pueden seleccionarse indistintamente. Por las características del diseño este sistema es económicamente viable y cuenta con cinco grados de libertad activos, uno en cada dedo. Se muestra un primer experimento consistente en generar el movimiento de extensión de la falange a través de la inyección de aire en la funda termoretractil y se valora mediante la obtención de la trayectoria generada en cinco pacientes sanos. Finalmente se muestra la valoración del dispositivo tras comparar estos resultados con las trayectorias teóricas.

Palabras Clave: rehabilitación robótica, accidente cerebrovascular, neumática.

1 INTRODUCCION

El envejecimiento de la población mundial es un hecho notorio en las últimas décadas. El número de personas con una edad igual o mayor a 60 años se ha duplicado desde 1980 [9], este hecho además de proporcionar conclusiones satisfactorias como el mejoramiento de la salud en las personas, trae consigo retos en diferentes áreas científicas. En medicina, la incidencia de algunas enfermedades y, en concreto, las de tipo cerebrovascular entre las que se destaca el accidente cerebrovascular (ACV) aumentan proporcionalmente con la edad [8]. El ACV es una enfermedad crónica de carácter sobrevenido la cual adquiere gran relevancia para la salud pública por la complejidad de sus secuelas además de sus múltiples repercusiones en el plano familiar, sanitario, social y económico.

Así, por ejemplo, en el mundo cada 40 segundos alguien sufre un accidente cerebrovascular [6], esto trae consigo secuelas, entre las secuelas cabe destacar algún tipo de hemiparesia, que se expresa en inconvenientes para el desarrollo de algunas actividades [3]. Una de las principales secuelas de un ACV es la limitación del movimiento del miembro superior, que involucra brazo, codo, muñeca y mano siendo esta ultima el instrumento que permite realizar actividades propias del ser humano proporcionándole una calidad de vida satisfactoria, razón por la cual es de vital importancia su rehabilitación. Para esto, existe la posibilidad de realizar terapia convencional que a menudo involucra movimientos repetitivos [1] y que por lo general es poco motivadora para los pacientes y tediosa para los profesionales, una alternativa adicional que puede reducir la carga de trabajo de los profesionales y representar beneficios para los pacientes entre los que se destaca control preciso en la evolución de su tratamiento implica la utilización de robots, que hasta el momento ha tenido resultados satisfactorios [7].

Algunos robots de rehabilitación de mano desarrollados hasta el momento son: HEXXOR, que consta de dos módulos que permiten controlar por separado los movimientos de los dedos y el pulgar, se adapta a diferentes tamaños de mano y brinda asistencia de fuerza de acuerdo a las necesidades del paciente [11], también existen dispositivos de tipo guante, como el GLOREHA que deja la palma totalmente libre, tiene poco peso y cuenta con un software que permite la representación en 3D de los movimientos realizados [2]. Otros dispositivos como el Hand of Hope (HOH) permiten la auto iniciación del movimiento a través de señales electromiograficas (EMG) y ofrece la simulación diferentes actividades cotidianas [10]. Finalmente, el AMADEO brinda diferentes niveles de resistencias

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de flexión y extensión de cada dedo, a la vez que mide los rangos de movimiento [12].

Otros estudios demuestran la viabilidad en la utilización de músculos neumáticos para la construcción de mecanismos de asistencia humana mediante la construcción de dispositivos tipo guante que permiten la realización de agarre esférico, cilíndrico, fino, entre otros [4]. Razón por la que en este artículo se expone el diseño y construcción de un dispositivo para rehabilitación de mano que permite la apertura de ésta usando una funda termoretractil que actúa de manera similar a un musculo neumático en cada uno de los dedos.

2 MATERIALES Y METODOS.

2.1 Diseño del sistema modular:

El mecanismo diseñado es básicamente un músculo neumático adaptable. Cada módulo consta de un interior flexible y una carcasa semirígida que permite modular el movimiento producido por el incremento de la presión anterior. El movimiento en cada uno de los dedos se genera una vez se inyecta aire en un globo ubicado al interior de la carcasa, tal como se muestra en la figura 1. En este primer prototipo las carcasas se construyeron utilizando termoretractil para cables electrónicos, y modificando el termoretractil en las articulaciones.

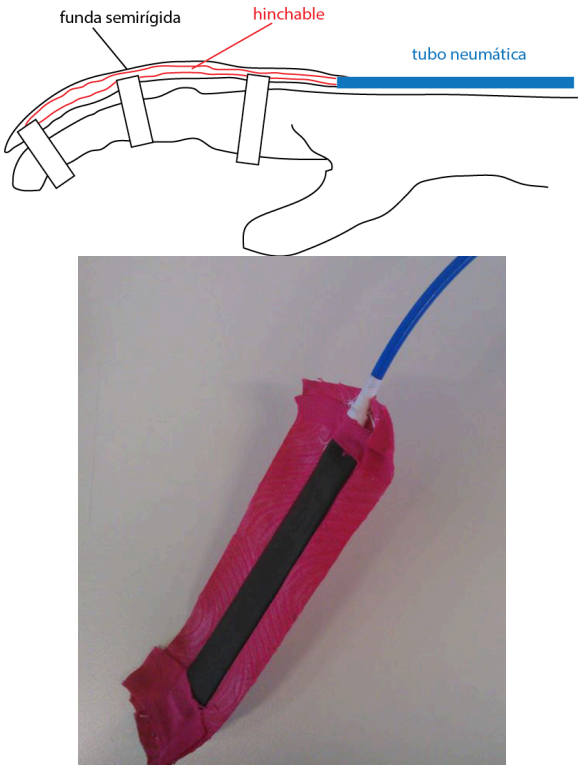


Figura 1. Esquema del mecanismo.

La principal característica es la modularidad del sistema, de forma que se han diseñado diferentes módulos de diferentes tamaños. En función de la terapia definida para cada paciente, se colocarán tantos módulos como sean necesarios. En la figura 2 se muestra como ejemplo un módulo grande adaptado al dedo índice de un paciente sano.

La funda termoretractil se adhiere a los dedos de tal forma que tiene contacto con estos en las falange distal y proximal, también presenta un contacto en la parte dorsal de la mano tal como se observa en la figura. De esta forma se consigue que la estimulación sea dorsal, liberando la palma de la mano de cualquier estímulo táctil. Esto es de especial importancia en la rehabilitación neuronal, debido a que los estímulos recibidos deben estar en concordancia con los movimientos producidos.

Figura 2.Posicion inicial y final del dedo.

El sistema diseñado consta de los siguientes materiales:

- 1 única válvula proporcional reguladora de presión MPPES-3-1/8-6-010 que entrega una presión máxima de 6 bares relacionados linealmente con una entrada de 0-10 voltios,
- 5 amplificador operacional UA741CP encargado de elevar el valor de tensión del pin PWM
- 5 relés de estado sólido G3R-ODX02SN-UTU que permiten el accionamiento de las válvulas 2/2
- 5 válvulas 2/2, encargadas de individualizar la presión en cada módulo.
- 1 tarjeta Arduino Uno encargada del control de las válvulas y equipo electrónico.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

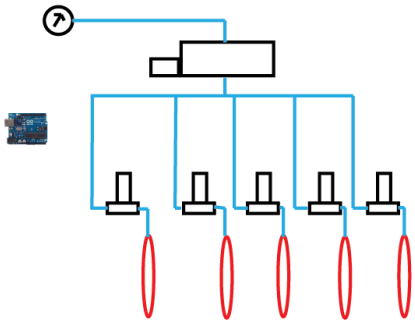


Figura 3. Esquema de conexiones neumáticas.

Para la definición y control de la terapia se ha diseñado una interfaz de usuario amigable bajo Matlab®. Esta interfaz (figura 4) permite controlar hasta 5 módulos, de forma que se puede armar un sistema de 5 grados de libertad, uno para cada dedo.

Por otro lado, la interfaz desarrollada permite al usuario una interacción sencilla y amigable. En esta primero se establece la conexión entre Matlab® y la tarjeta arduino, que requiere la instalación de los drivers y el entorno integrado de desarrollo (IDE) , al igual que la instalación de la librería Arduino IO que permite comandar la tarjeta desde Matlab® [5]. Finalmente el usuario selecciona si desea iniciar nuevamente el proceso o finalizarlo, en el segundo caso se da por terminada la conexión.

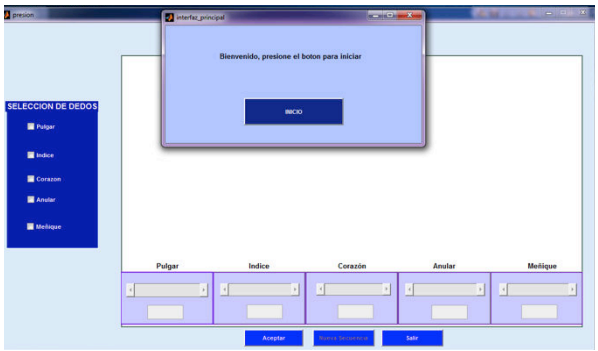


Figura 4. Interfaz de usuario para control de los módulos.

Mediante esta interfaz se establece también el orden con el que son accionadas las electroválvulas, este obliga a activar primero aquellas a las que se les ha asignado un mayor valor de presión, ofreciendo así posibilidad de la creación diferentes secuencias en la apertura de los dedos al igual que la reducción de aire residual presente en los tubos.

Con objeto de optimizar las variaciones de presión que debe realizar la válvula servoproporcional, una vez programada la terapia y el nivel de presión que se solicita para cada módulo, el sistema de control obtiene una secuencia de accionamiento de las electroválvulas 2/2 que se explica mediante la figura 5.

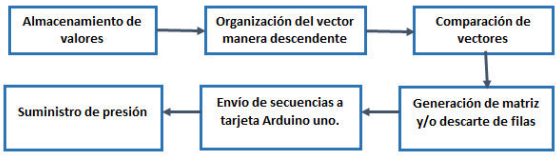


Figura 5: Diagrama de secuencias del accionamiento de las electroválvulas.

En el primer bloque el valor de presión ingresado a cada dedo se almacena en un vector genérico:

$$P = [A, B, C, D, E]$$

donde las entradas corresponden a los dedos pulgar a meñique respectivamente. Posteriormente en el segundo bloque este vector es ordenado de manera decreciente. El tercer bloque corresponde a la comparación de los vectores de salida de los anteriores bloques, con el fin de hallar aquellas posiciones en las que fueron ingresados los valores, colocando un uno (1) en estas y un cero (0) en las que no, formándose un nuevo vector por cada una de las componentes del vector original P. El cuarto bloque considera los casos en los que dos o más valores de presión seleccionados para cada dedo se repiten, pues se origina un duplicado de secuencias, de manera que es necesario descartar aquellos vectores repetidos antes de enviarlos a las salidas digitales de la tarjeta arduino en el quinto bloque. El sexto bloque permite el suministro de presión de manera gradual, a través del control de una válvula servoproporcional reguladora de presión que tiene una relación lineal entre el voltaje de entrada y la presión entregada. Esta válvula servo es controlada mediante una salida PWM de la tarjeta

El tiempo invertido en proveer a cada una de las fundas termoretractiles la presión asignada por el usuario es directamente proporcional a este valor, puesto que el incremento de presión con el que se consigue alcanzar la presión final es constante durante toda la secuencia.

2.2 Sistema de control de la posición:

Se diseñó en Autodesk Inventor un sistema que permitiera tanto el montaje de varios módulos (hasta 5 en una mano) y a la vez permitiera conocer el grado de desplazamiento que se había registrado. Para ello se montó una pieza rígida sobre el antebrazo del paciente. En esta pieza se colocan los tubos flexibles de neumática. Dado que estos tubos se desplazan proporcionalmente al incremento de presión que se produce en el interior de cada módulo, se optó por utilizar este desplazamiento como medida aproximada del ángulo girado por cada falange.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Con base en esto y las medidas tomadas en las muñecas de 4 usuarios, se diseña el siguiente mecanismo:

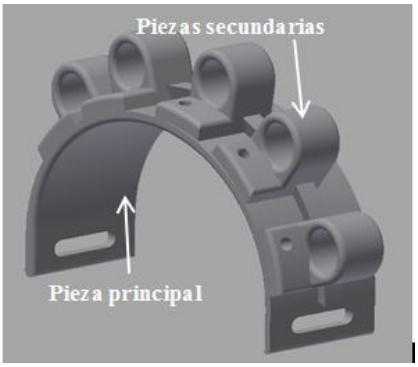


Figura 6: Mecanismo diseñado.

La pieza principal es ubicada fácilmente sobre el antebrazo del paciente y alberga las piezas secundarias cuya ubicación puede variar dentro de la pieza principal; estas piezas permiten el desplazamiento de los tubos, con lo que se tiene un sencillo sistema que permite manipular la orientación de cada uno de los tubos, dando libertad entre la separación de cada uno de los dedos.

2.3 Cuantificación del desplazamiento del dedo:

Se colocó una webcam solidaria a la pieza de la figura 6, de forma que captaba la posición de los tubos neumáticos. La figura 7 muestra la captura de la cámara cuando se habían colocado 4 módulos. La cuantificación del desplazamiento de cada uno de los dedos se realiza a través del desplazamiento del tubo utilizado en cada funda termoretractil, para esto se coloca una marca de color blanco, que fácilmente se distingue sobre el tubo; en seguida se hace uso de Matlab® para identificar el desplazamiento de las marcas y en consecuencia de los dedos.

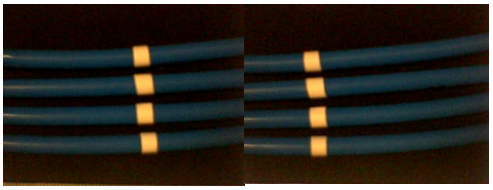


Figura 7: desplazamiento de los tubos neumáticos

Los pasos seguidos para obtener el desplazamiento de las marcas son:

- Obtención de la imagen.
- Conversión a escala de grises.
- Determinación del umbral para obtener imagen binaria.
- Obtención de la imagen binaria.
- Eliminación del ruido aplicando transformada de ganancia o pérdida.
- Etiquetado de objetos.
- Extracción de características.

3. EXPERIMENTACION Y RESULTADOS:

Se utilizó un mecanismo que consta de un globo recubierto por un termoretractil en el dedo índice de 5 usuarios. Luego se aplicó una presión 3.6 bares de manera gradual, es decir con valores que se incrementaron linealmente durante aproximadamente 30 segundos, mientras esto se realizaba se les pidió a los usuarios que permanecieran en reposo y no opusieran ningún tipo de resistencia. Para obtener datos acerca de la trayectoria 3D seguida por el dedo se empleó el dispositivo LEAP motion que entrega la posición de este en cada momento en las tres dimensiones.

El montaje empleado constaba de un soporte sobre el cual el usuario colocaba su brazo, extendiéndolo de tal forma que el dedo se ubicaba a una altura de 25.5 cm respecto al LEAP, por la forma en la que se ubicó este dispositivo, la altura correspondía al eje y, el eje x apuntaba en dirección paralela del mismo y el eje z apunta hacia el usuario, razón por la cual el movimiento del dedo se registra en el plano YZ.

Luego se modela la trayectoria teórica del dedo índice al mover únicamente la articulación metacarpofalangica (MCP), esto corresponde a la trayectoria 1, luego las articulación interfalangica proximal (PIP) y la articulación MCP juntas (trayectoria 2), y finalmente las articulaciones MCP, PIP y DIP simultáneamente (trayectoria 3), con el fin de comparar los datos teóricos y los obtenidos mediante el Leap Motion.

La trayectoria obtenida en los cinco (5) usuarios y las trayectorias teóricas se muestran en la figura 7:

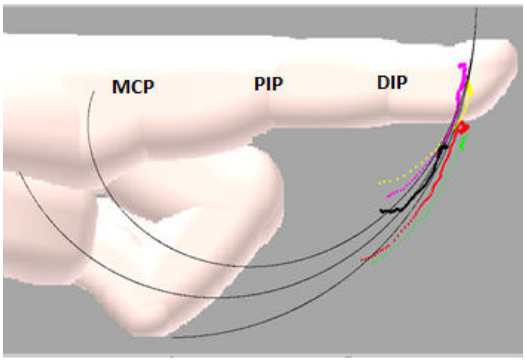


Figura 7. Trayectoria descrita por el dedo índice de 5 usuarios.

El cálculo de las trayectorias se realizó mediante las componentes horizontal y vertical del vector de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

desplazamiento teniendo en cuenta el sentido del movimiento, a continuación se muestra el grafico donde se presentan los tres tipos de trayectorias:

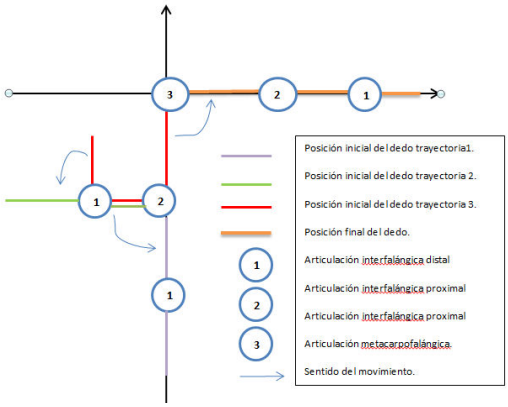


Figura 8.Trayectorias teóricas del movimiento de una falange.

Finalmente, se calculó el error cuadrático medio de cada uno de los usuarios con respecto a las trayectorias teóricas, y posteriormente el promedio de estos valores, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Error cuadrático medio.

Numero de usuario	Error trayectoria 1(mm)	Error trayectoria 2(mm)	Error trayectoria 3(mm)
Usuario 1	34.0844	31.1021	24.0905
Usuario 2	41.0481	38.5050	30.4005
Usuario 3	43.1618	41.2184	33.1276
Usuario 4	29.9187	28.0853	23.1525
Usuario 5	28.0047	25.6582	21.3166
Media:	35.2435	32.9138	26.4176

4. DISCUSIÓN:

Los resultados obtenidos corroboran lo observado, es decir, que el termoretractil genera un movimiento correspondiente a la apertura de las tres articulaciones simultáneamente.

Los resultados también muestran un promedio alto de error cuadrático medio en comparación con el rango de movimiento graficado en los cinco pacientes, esto puede ser consecuencia de que la trayectoria descrita por la falange distal solo podía ser detectada por Leap Motion al final del movimiento y por lo tanto los puntos al inicio de la trayectoria, es decir, cuando el dedo inicia su apertura aportan un mayor error cuadrático medio.

El material empleado en el diseño aún debe ser mejorado, debido a que por características del termoretractil este tiene un diámetro mayor al que se necesita y por lo tanto es visiblemente grande para usuarios con manos pequeñas, también su diámetro de compresión (diámetro menor, obtenido al calentarlo) es mayor al diámetro del tubo empleado, razón por la que en el punto en que se unen el globo y el termoretractil, que es el mismo punto por donde entra el aire se pueden presentar fugas.

Respecto a la obtención de la trayectoria, como el inicio del movimiento del dedo no podía ser detectado, y debido a que el Leap Motion funciona con radiación infrarroja se presentó gran número de interferencias, así que sería mejor emplear otra tecnología para hacerlo.

Agradecimientos:

Este trabajo se ha realizado en el marco de colaboración entre la Universidad del Cauca (Colombia) y la Universidad Miguel Hernandez (España), en virtud del cual la autora principal ha realizado una estancia de 3 meses desarrollando este trabajo.

Referencias:

[1] Bejarano, J. M. L., de la Torre, F. T., Rodríguez, J. Z., Rodríguez, I. L., & Canales, J. C. M. (2006). *Guía de buena práctica clínica en prevención del ictus*. International Marketing & Communication.

[2] Borboni, A., Fausti, D., Mor, M., Vertuan, A., & Faglia, R. Un dispositivo CPM per la riabilitazione della mano.

[3] Fernández Gómez, E., Ruiz Sancho, A., & Sánchez Márquez, G. (2010). Tratamiento de la extremidad superior en la hemiplejia desde Terapia Ocupacional. *Rev Elect Terapia Ocup Galicia*, (11).

[4] In, H., Cho, K., Kim, K., & Lee, B. (2011, June). Jointless structure and under-actuation mechanism for compact hand exoskeleton. In *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference*.

[5] Matlab Central, MATLAB Support Package for Arduino (aka ArduinoIO Package) recuperado el 28 de junio de 2014 de http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32374-matlab-support-package-for-arduino--aka-arduinoio-package-

[6] Mozaffarian D, Roger VL, Benjamin EJ, Berry

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

JD, et al . Heart disease and stroke statistics—2013 update: a report from the American Heart Association . Circulation . 2013;127:e000-e000.

[7] Newport, R. (2006). Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular. *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, *41*, 66-73.

[8] Organización Mundial de la Salud(s.f), Enfermedades cardiovasculares, recuperado el 28 de junio de 2014 de http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/es/

[9] Organización Mundial de la Salud(s.f), *10 datos sobre el envejecimiento de la población,* recuperado el 28 de junio de 2014 de http://www.who.int/features/factfiles/ageing/es/

[10] «Indistinguishable from MAGIC - Knowledge Transfer at PolyU». [En línea], recuperado el 26 de junio de 2014 de http://www.polyu.edu.hk/ife/corp/upload/docs/8_publication/KT_Eng_2012/05.html

[11] Schabowsky, C. N., Godfrey, S. B., Holley, R. J., & Lum, P. S. (2010). Development and pilot testing of HEXORR: hand EXOskeleton rehabilitation robot. *J Neuroeng Rehabil*, *7*(36), 1-16.

[12] Stein, J., Bishop, L., Gillen, G., & Helbok, R. (2011, June). A pilot study of robotic-assisted exercise for hand weakness after stroke. In *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Reconstrucción 3D de racimos de uva basada en estéreo-visión

Carlos Alberto Molina Toscano
Universitat Politècnica de València, carmotos@etsii.upv.es

Antonio José Sánchez Salmerón
Universitat Politècnica de València, asanchez@isa.upv.es

Eugenio Ivorra Martínez
Universitat Politècnica de València, euivmar@upvnet.upv.es

Resumen

El tamaño de las bayas de uva es uno de los parámetros fundamentales que determinan la calidad de la uva de vino. Recientemente en la literatura se han propuesto métodos de estimación de tamaño de las bayas utilizando sistemas monoculares junto con objetos de calibración. Sin embargo en este trabajo se describe un procedimiento automático para la reconstrucción 3D de racimos de uvas a partir de pares estéreo de imágenes. El método propuesto se basa en la correspondencia de los círculos detectados por medio del algoritmo Hough y la resolución del problema de correspondencias utilizando restricciones epipolares, de gradientes y de color.

Palabras Clave: estereovisión, reconstrucción 3D, detección círculos.

1. Introducción

La calidad del vino depende principalmente de la calidad de los granos de uva con los que está hecho. Las prácticas actuales para estimar la calidad de la uva requieren costosos análisis destructivos o análisis subjetivos de expertos. Desafortunadamente, no solo la subjetividad de los análisis, sino también el corto periodo de tiempo disponible para llevar a cabo estos análisis durante la cosecha, la falta de herramientas de medida y su alto coste económico, hacen difícil medir la calidad de la uva.

El tamaño de las bayas de uva es uno de los parámetros fundamentales que determinan la calidad de la uva de vino, ya que dicho tamaño establece una relación entre la cantidad de piel y de pulpa del racimo. Recientemente se ha publicado un trabajo de investigación orientado a la estimación del tamaño de bayas de uva de vino [1], donde se detectan círculos sobre una imagen y se clasifican los granos de uva. En este trabajo se estima el tamaño de las bayas de uva mediante un sistema monocular y la inserción de un objeto de calibración de tamaño conocido en la escena. Sin embargo sería interesante utilizar un sistema estereoscópico, evitando así la necesidad de tener que insertar un objeto de calibración conocido.

Un racimo de uva tiene una geometría compleja ya que está formado por un aglomerado de cuasi-esferas donde se producen muchos ocultamientos y recovecos. De ese modo, el control de calidad automático de los racimos mediante visión artificial resulta un problema complejo de resolver. Sin embargo existen muchos métodos que permiten extraer información 3D a partir de imágenes 2D. Estos métodos se pueden clasificar en activos y pasivos. Los métodos activos [2, 3] son aquellos que emiten un patrón de luz sobre la escena para analizar su deformación, mientras que los métodos pasivos, como la estereoscopía [4], solo utilizan la iluminación ambiente.

Aunque la estereoscopía es muy simple, dentro del ámbito de la inspección de alimentos, no se han realizado muchos trabajos utilizando esta técnica. Esto se debe principalmente a que el problema de correspondencia es difícil de resolver. Algunos trabajos interesantes que utilizan la estereoscopía son para, detectar malezas [5], medir el tamaño de granos de trigo [6], estimar la firmeza en salmón [7] y medir el volumen de rodajas de manzana durante el proceso de secado [8]. En todos estos casos se utilizaron los bordes como características para resolver el problema de correspondencias.

Con el objetivo de determinar automáticamente el tamaño de las bayas de uva, en este trabajo se presenta un procedimiento estereoscópico basado en la correspondencia de los círculos detectados en el par de imágenes por medio del algoritmo Hough [9] y la resolución del problema de correspondencias utilizando restricciones epipolares, de gradientes y de color.

El procedimiento se divide en 3 fases: procesado de imagen, búsqueda de correspondencias y reconstrucción 3D.
Para llevar a cabo cada una de las fases se utiliza la herramienta software MATLAB.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2. Procesado de imágenes

Se parte de un par de imágenes RGB capturadas con un sistema estereoscópico Bumblebee2 (Point Grey Research Inc, Richmond, BC, Canada) modelo BB2-08S2C-25, las cuales han sido obtenidas en condiciones de laboratorio con un fondo controlado. Inicialmente se corrige la distorsión de las imágenes capturadas y también se rectifican a partir de los datos de calibración de las cámaras [10], [11] y [12].

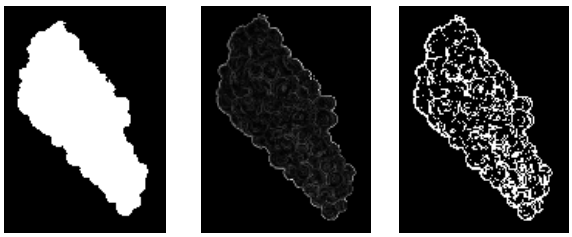
A continuación se detalla los pasos a seguir, a partir del par estéreo de imágenes RGB rectificadas de los racimos (Figura 1).

a. b.

Figura 1: Imágenes RGB rectificadas. a. Izquierda. b. Derecha

2.1. Segmentación

Las imágenes han sido tomadas bajo condiciones de laboratorio, por lo tanto, se ha forzado a que haya un fondo de imagen que contraste, claramente, con el racimo de uvas. De esta manera el racimo se segmenta fácilmente del fondo, utilizando, en primer lugar, umbrales de color en R, G y B y posteriormente el algoritmo de Otsu [13] sobre las imágenes resultantes en escala de grises, obteniéndose así la máscara del racimo, Figura 2.a.



a. b. c.

Figura 2: a. Máscara del racimo utilizando el método Otsu. b. Magnitud del gradiente. c. Bordes. Píxeles cuya magnitud de gradiente ha superado un umbral.

2.2. Estimación de círculos

El aspecto más importante a resolver para la estimación de los círculos, que representan las bayas, es la detección de bordes; ya que, dependiendo de la calidad de éstos (definición y cantidad de píxeles), la estimación puede ser más fiable o no.

2.2.1. Bordes

Para la detección de bordes se ha utilizado un detector gradiente discreto (G), empleado tanto en dirección horizontal (g_x) como vertical (g_y), aprovechando el valor de la magnitud.

$$|\nabla G| = \sqrt{\left(\frac{\Delta G}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{\Delta y}\right)^2} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \qquad (1)$$

El gradiente se aplica sobre la imagen de grises enmascarada, Figura 2.b. El gradiente se umbraliza para obtener aquellos bordes con magnitud más elevada, que implica que tienen más probabilidad de ser píxeles de borde, Figura 2.c.

2.2.2. Detección de círculos

Se ha implementado el algoritmo Hough [9] para detectar los círculos en cada una de las imágenes, ver Figura 4. Este algoritmo se divide en 3 fases: acumulación en el espacio de parámetros, detección de picos y filtrado de resultados.

Acumulación

El espacio de parámetros define todos las posibles combinaciones que pueden tener los parámetros que definen un círculo: posición del centro (X, Y) y radio (R). Se crea una matriz M_{mxnxp}, donde cada $M(x,y,r)$ corresponde a la posición x e y del centro del círculo de radio r.

La matriz tiene sus celdas inicializas a cero, cada vez que se encuentre un círculo de radio k y centro (i,j) el valor la celda $M(i,j,k)$ se incrementa en una unidad, esto se hace con cada una de las opciones que se definen en el espacio de parámetros para cada característica de borde.

Detección de picos

Una vez que la matriz M está completada, se buscan aquellas celdas que tengan un mayor valor, lo que indica que hay más probabilidades de que sea un círculo. Se ordenan de mayor a menor probabilidad y se escoge un número fijo de círculos a detectar, que además, cumplan unos criterios de localización.

Se escoge un número lo suficientemente alto de círculos a detectar, se toman los 50 mejores, y como criterio de localización se ha determinado que no puede haber un solapamiento de círculos de más del 50%, es decir, la separación entre centros debe ser como mínimo del radio de la baya.

Cabe resaltar que debido a que normalmente los círculos de menor radio tienen mayor probabilidad de ser detectados que los de radio mayor, se ha optado por separar el proceso de detección por radios, es decir, se tomarán los 50 primeros círculos para un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

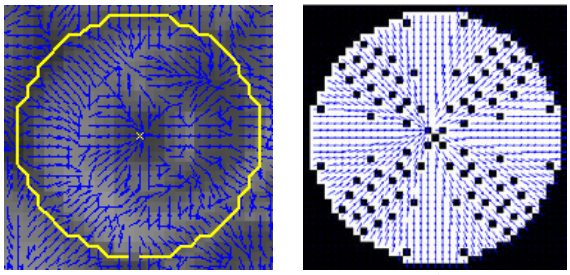
determinado radio y el criterio de localización se cumplirá para estos. Por lo tanto, al unir todas estas detecciones, puede que haya varios círculos que estén solapados más allá del 50%.

Filtrado

Para descartar, en la medida de lo posible, los falsos positivos de círculos detectados, se realiza un filtrado. El filtrado permite reducir, el coste computacional y el error en la búsqueda de correspondencias.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (2)$$

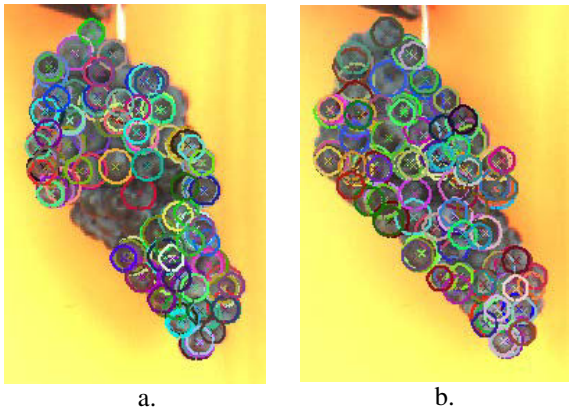
El filtrado se basa en la comparación de la orientación del gradiente (2) del círculo detectado sobre la imagen en escala de grises y un patrón ideal del mismo radio (Figura 3).



a. b.

Figura 3. Comparación de la orientación del gradiente. a. Círculo detectado. b. Patrón

Si la discrepancia entre las orientaciones detectadas y las ideales supera un umbral, la detección de dicho círculo se descarta.



a. b.

Figura 4: Circulos detectados con Hough. a. Izquierda. b. Derecha.

3. Correspondencias

La propuesta que se hace para resolver el problema de las correspondencias es definir dos índices, uno asociado a la correspondencia que tienen cada par de círculos (coste de correspondencia (c_{ij})), y otro asociado al ocultamiento del círculo (coste de ocultamiento (o_{ij})).

Para establecer los índices, se mide la discrepancia que hay entre pares (izquierdo y derecho) de los círculos detectados. Los factores que determinan el valor (coste) son: características de color, disparidad y orientación del gradiente.

$$c_{ij} = c_{ijDISPARIDAD} + c_{ijGRADIENTE} + c_{ijCOLOR} \quad (3)$$

i, círculo en la imagen izquierda.
j, círculo en la imagen derecha.
$c_{ijDISPARIDAD}$, disparidad entre centros i y j.
$c_{ijGRADIENTE}$, error de comparación de la orientación del gradiente entre i y j.
$c_{ijCOLOR}$, índice de comparación de color entre i y j.

$$o_{ij} = o_{ijDISPARIDAD} + o_{ijGRADIENTE} + o_{ijCOLOR} \quad (4)$$

Para reducir el número de posibles pares candidatos, se define un ancho de banda de búsqueda, donde, los círculos que caen dentro de ésta banda generan dos matrices mxn, siendo m es el número de círculos detectados dentro de la banda en la imagen izquierda y n es el número de círculos detectados dentro de la banda en la imagen derecha.

En la primera de las matrices (matriz de coste correspondencia) cada celda alberga el valor del coste de correspondencia c_{ij}, ver Tabla 1. La segunda matriz (matriz de coste de ocultamiento) almacena en cada celda el valor del coste de ocultamiento o_{ij}, ver Tabla 2.

Tabla 1: Matriz de costes de correspondencia

	1	2	3	…	n
1	c_{11}	c_{12}	c_{13}		c_{1n}
2	c_{21}	c_{22}	c_{23}		c_{1n}
…					
m	c_{m1}	c_{m2}	c_{m3}		c_{mn}

Tabla 2: Matriz de costes de ocultamiento

	1	2	3	…	n
1	o_{11}	o_{12}	o_{13}		o_{1n}
2	o_{21}	o_{22}	o_{23}		o_{2n}
…					
m	o_{m1}	o_{m2}	o_{m3}		o_{mn}

El objetivo es encontrar un camino que vaya desde la posición (1, 1) hasta la (m, n) que minimice el coste total (suma de coste de las celdas de cada camino). El coste de cada celda es el mínimo entre su coste de correspondencia y su coste de ocultamiento. Para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

hacer la búsqueda más eficiente se han ordenado los círculos de izquierda a derecha, y siguiendo un criterio de posicionamiento horizontal (una baya no puede estar arriba o debajo de otra), cuando se considera que un círculo encuentra su homólogo, se pasa al círculo de la siguiente posición, ya que no pueden existir dos círculos visibles con el mismo círculo homólogo.

Para resolver el problema de encontrar el camino de mínimo coste, se puede utilizar un algoritmo como el dijkstra [14], el resultado debería ser como el de la Tabla 3. En nuestro caso se utiliza programación dinámica.

Tabla 3: Matriz con camino de mínimo coste

	1	2	3	…	n
1	o_{11}	c_{12}			
2			o_{23}	c_{2i}	
…					o_{jn}
m					c_{mn}

4. Reconstrucción 3D

4.1. Triangularización

A partir de las parejas de círculos (proyecciones) resultantes de aplicar las correspondencias y, teniendo en cuenta las características intrínsecas (2) y extrínsecas (3) de la estéreo cámara se estima un modelo 3D de la posible esfera generada.

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\alpha_x = \frac{f_x}{d_x}$, distancia focal horizontal en píxeles.
$\alpha_y = \frac{f_y}{d_y}$, distancia focal vertical en píxeles.
$f = f_x = f_y$, distancia focal en mm.
d_x, d_y, tamaño del píxel en x e y.
x_0, y_0, punto principal expresado en píxeles.

$$RT = \begin{bmatrix} R_{3x3} & T_{3x1} \\ O_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

R_{3x3}, matriz de rotación.
T_{3x1}, matriz de traslación.

En la generación del modelo 3D se tiene en cuenta la disparidad (d) y la línea base (b) de la cámara, con la que se estima la profundidad (5), del centro de la baya.

$$d = x_{izq} - x_{der} \quad (4)$$

x_{izq}, x_{der}, posición del centro de la proyección izquierda y derecha en x.

$$Z = \frac{b \cdot f}{d} \quad (5)$$

Z, profundidad del centro de la baya en coordenadas del mundo real.

El problema de reconstruir una esfera a partir de sus proyecciones tiene solución única, por lo que para calcular el resto de coordenadas (X, Y) del centro de la baya, basta con calcular el factor de escalado λ.

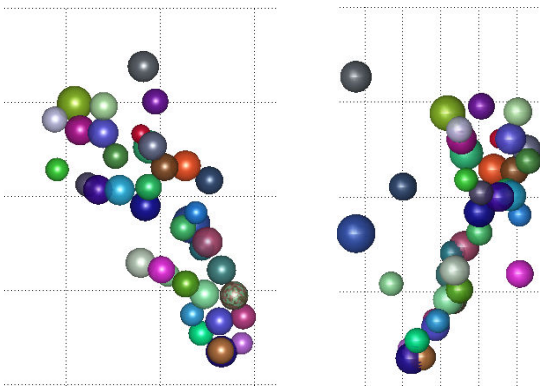
$$\lambda = \frac{Z}{f} \quad (6)$$

Así,

$$X = \lambda \cdot x \qquad Y = \lambda \cdot y \quad (7)$$

x, y, centro de la baya en coordenadas de imagen.

En modelo 3D del racimo de uvas obtenido, Figura 8, se puede apreciar como existen bayas que son incoherentes, tienen una posición anómala absoluta y/o relativa con el resto de bayas, con el resultado que se esperaría. Por lo tanto se aplica una etapa final de refinamiento.



a. b.

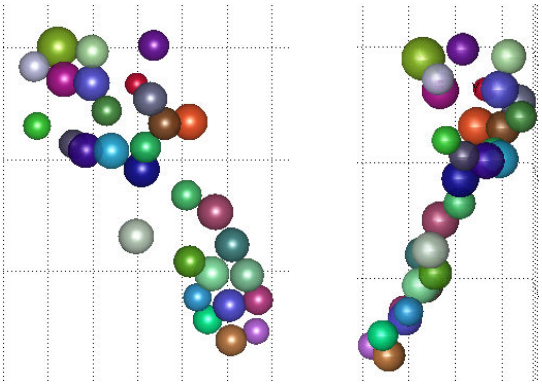
Figura 5: Racimo reconstruido. a. Alzado. b. Perfil

4.2. Refinamiento

El conocimiento, a priori, que se tiene de la morfología del racimo de uvas, puede ser aplicado para realizar un refinamiento final. Con el fin de obtener una reconstrucción de bayas que tenga más coherencia (el posicionamiento de las bayas sea acorde a lo que se esperaría de un racimo), es decir, la profundidad sea similar a la de las bayas aledañas, y estas a su vez deben formar una estructura similar a una colmena de abejas, como se observa claramente en la zona inferior de la Figura 4.a. Siguiendo estas premisas tal como se muestra en la Figura 4, la gran

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mayoría de la bayas incoherentes han sido eliminadas del modelo.



a. b.

Figura 6: Racimo reconstruido refinado. a. Alzado. b. Perfil.

5. Resultados y conclusiones

Se han reconstruido 100 racimos de uva de 10 variedades distintas, obteniéndose un ratio medio de bayas correctamente reconstruidas del 25% (aproximadamente 15 bayas) con un error de precisión en la reconstrucción menor a 1 mm.

Teniendo en cuenta que en el proceso manual de caracterización del tamaño medio de bayas de un racimo se utiliza un muestreo de unas quince bayas. Se puede concluir que se ha reconstruido una cantidad suficiente de vayas que permiten estimar el tamaño de baya medio del racimo de forma automática.

Uno de los aspectos que mayor importancia tiene en la reconstrucción de un modelo 3D es la obtención de bordes, cuanto más definidos estén mejor será la detección de círculos y por tanto mejor será la estimación del modelo 3D.

Otros aspectos que tienen también importancia son la calibración de la cámara y la definición de los umbrales de detección.

Se han definido umbrales fijos, pero idealmente deberían ser dinámicos para que los bordes que no tengan una elevada magnitud pero que se hallen en zonas donde la magnitud media sea baja, no sean descartados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria de España (INIA) a través del proyecto RTA2012-00062-C04-02, soportado por fondos europeos FEDER y el proyecto UPV-SP20120276.

Referencias

[1] Roscher, R., Herzog, K., Kunkel, A., Kicherer, A., Töpfer, R., & Förstner, W. (2014). Automated image analysis framework for high-throughput determination of grapevine berry sizes using conditional random fields. Computers and Electronics in Agriculture, 100, 148–158.

[2] Udomkun, P., Nagle, M., Mahayothee, B., & Müller, J. (2014). Laser-based imaging system for non-invasive monitoring of quality changes of papaya during drying. Food Control, 42(0), 225–233. doi:10.1016/j.foodcont.2014.02.010

[3] Verdú, S., Ivorra, E., Sánchez, A. J., Girón, J., Barat, J. M., & Grau, R. (2013). Comparison of TOF and SL techniques for in-line measurement of food item volume using animal and vegetable tissues. Food Control, 33(1), 221–226. doi:10.1016/j.foodcont.2013.02.031

[4] Cyganek, B., & Siebert, J. P. (2011). An introduction to 3D computer vision techniques and algorithms. John Wiley & Sons.

[5] Sachez, A. J., & Marchant, J. A. (2000). Fusing 3D information for crop/weeds classification. In Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on (Vol. 4, pp. 295–298 vol.4). doi:10.1109/ICPR.2000.902917

[6] Sun, C., Berman, M., Coward, D., & Osborne, B. (2007). Thickness measurement and crease detection of wheat grains using stereo vision. Pattern Recognition Letters, 28(12), 1501–1508. doi:10.1016/j.patrec.2007.03.008

[7] Quevedo, R., & Aguilera, J. M. (2010). Computer Vision and Stereoscopy for Estimating Firmness in the Salmon (Salmon salar) Fillets. Food and Bioprocess Technology, 3(4), 561–567. doi:10.1007/s11947-008-0097-3

[8] Sampson, D. J., Chang, Y. K., Rupasinghe, H. P. V., & Zaman, Q. U. (2014). A dual-view computer-vision system for volume and image texture analysis in multiple apple slices drying. Journal of Food Engineering, 127(0), 49–57. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.11.016

[9] D. Young, «Matlab Central. MathWorks Inc,» 2010. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26978-hough-transform-for-circles. [Último acceso: 16 07 2014].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[10] Ricolfe-Viala, Carlos; Sanchez-Salmeron, Antonio-Jose; Camera calibration under optimal conditions, Optics Express, 19, 11, 10769-10775, 2011, Optical Society of America.

[11] Ricolfe-Viala, Carlos; Sanchez-Salmeron, Antonio-Jose; Martinez-Berti, Enrique; Accurate calibration with highly distorted images, Applied optics, 51, 1, 89-101, 2012, Optical Society of America.

[12] Sánchez, Antonio; Calatayud, Ricardo; ,Auto-calibración de un sistema binocular de visión activa, Jornadas de Automática 2001.

[13] Otsu, N., "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.

[14] Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1, 269–271.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO

Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez, y Alfonso García-Cerezo
Universidad de Málaga, Andalucía Tech, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
amandow@uma.es

Resumen

El artículo presenta la remodelación del robot móvil Auriga-α. Del vehículo original, desarrollado en el año 2000, solo se ha conservado el sistema de locomoción. Además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico. Para ello, se han incorporado baterías $LiFePO_4$ con su correspondiente cargador y un generador monofásico. En el diseño, se han tenido en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. En conjunto, la remodelación consigue reducir la masa del vehículo y mejorar su eficiencia y autonomía energética. En la actualidad, el diseño está siendo implantado en el robot real.

Palabras clave: robótica móvil, vehículos híbridos eléctricos, baterías eléctricas.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica móvil puede beneficiarse de características de los vehículos híbridos eléctricos en cuanto a la combinación de fuentes de energía eléctrica y de combustión interna [3]. La combinación de sistemas eficientes de baterías con combustible de fácil repostaje permiten un incremento en autonomía y alcance que resulta crucial para las aplicaciones de campo de la robótica móvil, como la exploración y la respuesta a emergencias.

El reciente desarrollo de la tecnología de las baterías eléctricas hace posible, hoy día, la inclusión de celdas con una gran densidad de energía en el campo de la robótica móvil [11]. Así, se pueden introducir sistemas de alimentación basados en baterías eléctricas en aplicaciones de dimensiones considerables, donde hace tan solo unos años se hacía imprescindible el empleo de grandes generadores eléctricos [3]. A partir de este tipo de baterías, son ya varias las aplicaciones de robótica móvil donde se están implantando diversos sistemas de alimentación híbridos [9][5][10].

Este artículo propone la remodelación del robot móvil Auriga-α, desarrollado en el año 2000 con fines de investigación [4][6]. Manteniendo únicamente el sistema de locomoción, además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico. Con este fin, se proponen baterías recargables $LiFePO_4$ y un generador monofásico. En el diseño, se tienen en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. En conjunto, la remodelación consigue reducir la masa del vehículo y mejorar su eficiencia y autonomía energética. Este diseño se está implantando en el robot real.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se resumen los aspectos principales de la remodelación del vehículo. El diseño del sistema híbrido de alimentación se propone en el apartado 3. A continuación, la sección 4 describe la integración de sistemas en el robot. Finalmente, la sección 5 expone los resultados obtenidos y ofrece ideas para desarrollos futuros.

2. REMODELACIÓN DE AURIGA-α

Este trabajo ha formado parte de la actualización de los sistemas del robot móvil Auriga-α. Este robot se desarrolló en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga [8]. Sus dimensiones eran $1.35\,\text{m} \times 0.75\,\text{m} \times 0.92\,\text{m}$ y su peso $258\,\text{kg}$. Del

Figura 1: El vehículo original.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

vehículo original (ver Fig. 1) solo se ha conservado el sistema de locomoción, que se basa en dos motores CC con escobillas de 720 W y 60 V nominales para una tracción diferencial por cadenas [4]. Además de la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico, descrita en el apartado 3, en esta remodelación se han renovado:

- *Sistema de potencia*. Se ha incorporado una controladora dual Roboteq MDC2250 que permite el control de la velocidad de giro de cada uno de los motores en ambos sentidos y de modo independiente. Esta controladora integra las etapas de potencia, que aportan una salida regulada de tensión para los motores sin necesidad de dispositivos adicionales. Además, el dispositivo incluye sensores de tensión, intensidad y temperatura, así como entradas para los codificadores angulares de los motores. Asimismo, esta controladora incorpora regulación PID para referencias de velocidad, que permite programar valores máximos de aceleración en cada uno de los motores.
- *Sistema informático*. El objetivo del sistema informático a bordo del robot es ofrecer tanto una estructura de bajo nivel para gestionar las comunicaciones entre los dispositivos (e.g., sensores, telémetro láser, sistema de arranque del generador, *joysticks*, la controladora) como funciones de alto nivel para navegación y teleoperación. Este sistema se basa en un PC industrial con el sistema operativo Ubuntu (Linux) y ROS (*Robot Operating System*). Para la teleoperación del vehículo, se han diseñado tres modos: conducción como un automóvil con cambio de marchas automático, como un automóvil eléctrico y mediante señales de referencia todo-nada. Por otro lado, se han programado dos funciones de seguridad: una condición de "hombre muerto" y la detección de obstáculos mediante el telémetro láser. Esta última función se ha empleado para disminuir la velocidad máxima de navegación en caso de obstáculos próximos o para detener el vehículo si la distancia al obstáculo es inferior a un determinado umbral de seguridad.

3. SISTEMA HÍBRIDO DE ALIMENTACIÓN

En la remodelación del robot, se propone un sistema de alimentación híbrido mediante la acción conjunta de baterías y un generador monofásico de gasolina como apoyo auxiliar. El objetivo de esta configuración es aprovechar la elevada densidad de energía másica y volúmica que ofrecen las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía, lo cual permite reducir el peso total del vehículo a la vez que aumentar su autonomía energética. Asimismo, la combinación con un generador permite aumentar considerablemente la autonomía para misiones robóticas de larga duración [3]. La Fig. 2 muestra un esquema general del sistema híbrido de alimentación.

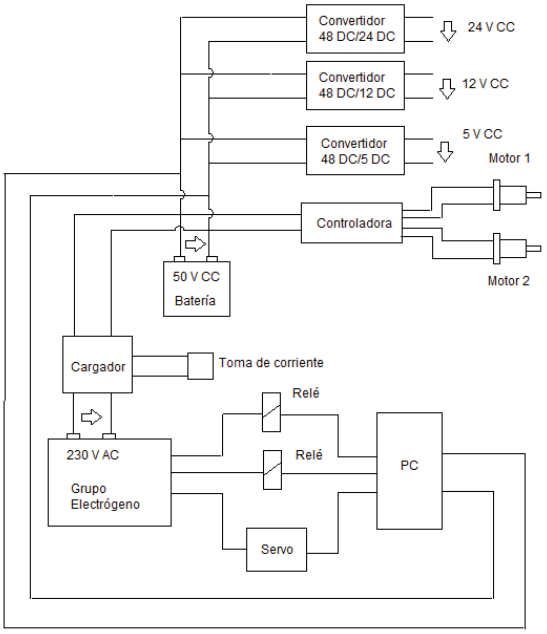


Figura 2: Diagrama del sistema híbrido de alimentación.

3.1. Sistema de baterías

Para el sistema de baterías se ha seleccionado la tecnología de Ion-Litio porque su eficiencia de recarga, densidad energética, ciclo de vida y potencia específica son muy superiores a otras alternativas como NiMH y Pb. Además, dentro de las baterías de Litio se han seleccionado las de Fosfato de Hierro ($LiFePO_4$) debido a características como su bajo mantenimiento, alta velocidad de carga, seguridad (no explotan o se incendian por sobrecarga), buen comportamiento ante vibraciones y mantenimiento de su capacidad de descarga hasta momentos antes de su agotamiento [1].

El sistema de baterías se ha configurado utilizando celdas de tensión nominal de 3.2 V, capacidad nominal de 40 A h y rango de operación entre 2.5 V y 4 V. En particular se han conectado 14 celdas en serie, de manera que la tensión a la salida total sea próxima a 50 V. Esta tensión alimenta a la controladora dual de los motores. Además, se han incluido tres convertidores DC/DC, de 48/5 V, 48/12 V

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

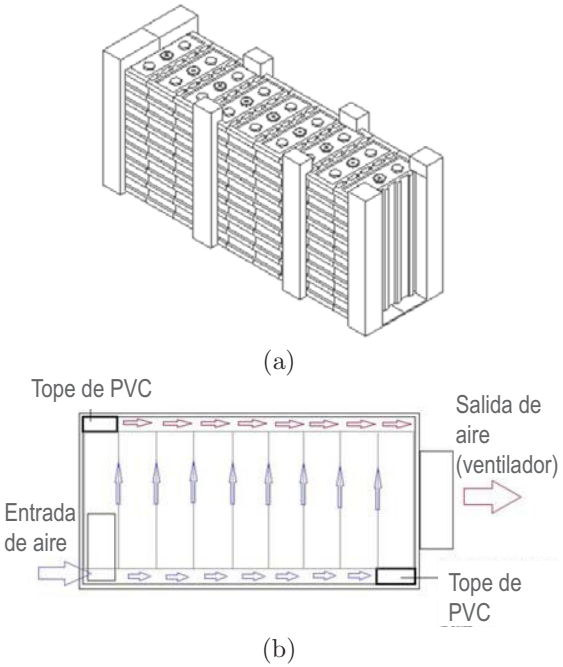


Figura 3: Caja para baterías y sistema de ventilación interna: a) disposición en el interior de la caja; b) circuito de ventilación (sección longitudinal).

y 48/24 V, para alimentar otros dispositivos a bordo del vehículo.

En la integración del sistema de baterías dentro de Auriga-α se ha considerado la protección ante elevadas temperaturas y ante sobrecargas, sobretensiones y desniveles de tensión entre distintas celdas. Estos aspectos se desarrollan a continuación.

3.1.1. Protección ante altas temperaturas

Si bien las baterías $LiFePO_4$ ofrecen buenas características de carga y descarga a temperatura elevada [2] y mininimizan el riesgo de explosión, la protección ante altas temperaturas resulta crítica para las baterías en robótica móvil. Con este fin, se ha diseñado una caja de soporte para las baterías que asegura la ventilación de las mismas (ver Fig. 3). El diseño incluye unas piezas de cloruro de polivinilo (PVC) que, además de aislar eléctricamente las celdas de la superficie de la caja, definen un circuito para la entrada-salida de aire de la caja. Además, se proporciona ventilación forzada mediante un ventilador situado en una de las caras de la caja. El orificio para entrada de aire se aprovecha también para los cables terminales de la batería, de modo que no es necesaria la apertura de la caja para acceder a ellos. La tapadera de la caja incluye en su cara interior una plancha de PVC que impide el contacto eléctrico con la misma.

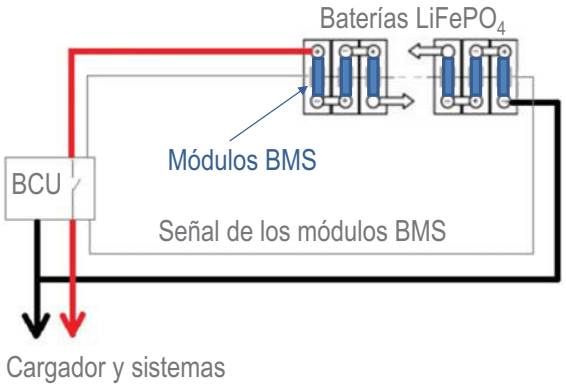


Figura 4: Esquema de conexión de baterías con BMS y BCU.

3.1.2. Sensibilidad ante sobrecargas y desniveles de tensión entre celdas

Para solucionar este problema se han incorporado equipos de gestión de carga y descarga de las baterías. Así, se ha empleado una unidad de control (BCU[1]) y un lazo de dispositivos equilibradores de tensión (BMS[2]), como se muestra en la Fig. 4. Para cada celda se instala un BMS entre sus bornes, que monitoriza su tensión. Si, durante la carga, la tensión de una celda sobrepasa un determinado umbral, su BMS activa un puente que reduce la corriente de carga. Además, todos los módulos BMS están enlazados mediante una señal de corriente supervisada por la BCU. En caso de que un BMS detecte un problema, éste abre el lazo para avisar a la BCU. Así, la BCU protege el sistema de baterías desconectándolo de la carga y la descarga en caso de sobretensión, sobretemperatura o sobrecarga.

Para la carga de las celdas se ha incorporado en el robot el cargador suministrado por el fabricante, que cumple con las curvas de tensión e intensidad apropiadas para este tipo de baterías y que se muestran en la Fig. 5(a). Como se aprecia en la figura, la carga de las baterías sigue tres etapas distintas:

1. *Carga a intensidad constante.* La tensión va aumentando paulatinamente mientras que se está forzando una corriente máxima de entrada a las baterías. En esta etapa, el cargador suministra corriente tanto a la batería como al resto de equipos del robot, incluyendo la alimentación de los motores para la navegación.

2. *Carga a tensión constante.* La intensidad va disminuyendo de forma exponencial a medida

[1] *Battery Control Unit.*
[2] *Battery Management System.*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

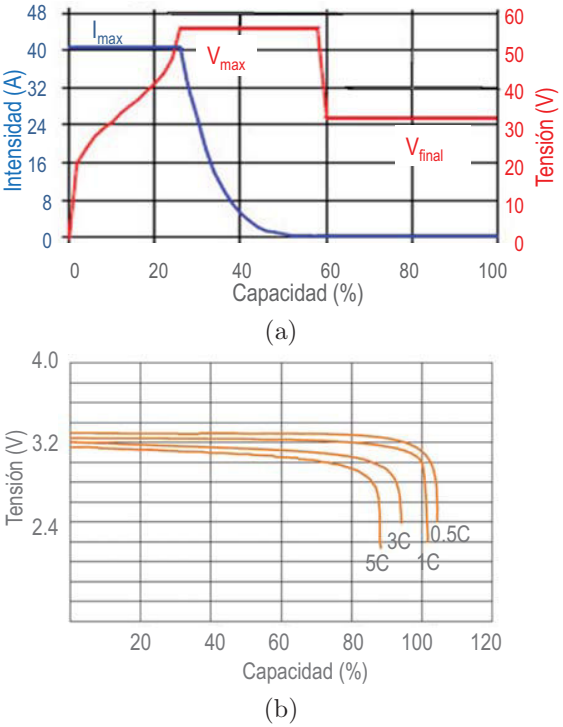


Figura 5: Curvas de carga (a) y descarga (b) de las baterías.

que el estado de carga se aproxima al máximo. En esta etapa, el conjunto cargador/baterías no es capaz de suministrar niveles de corriente suficientes para alimentar a los motores, por lo que la navegación no es posible.

3. *Etapa de recuperación.* En esta etapa no se suministra intensidad, lo que provoca una caída desde la tensión máxima V_{max} a un valor final V_{final}. En esta etapa las baterías funcionan como si no estuviesen conectadas al cargador, por lo que pueden alimentar al vehículo para la navegación.

En la Fig. 5(b) se muestran las curvas de descarga para distintas demandas de corriente, donde C se refiere a la corriente o capacidad de descarga nominal de la celda. Estas curvas se caracterizan por una pendiente muy suave durante prácticamente todo el recorrido cayendo bruscamente al llegar a un límite de descarga próximo a los 2.8 V. Para el conjunto de baterías, la tensión a la que se produce esta caída es de aproximadamente 42 V.

3.2. Generador monofásico

La función del generador monofásico es suministrar energía al cargador de las baterías en el momento en el que el nivel de carga de éstas descienda por debajo de un umbral mínimo. Asimismo, el generador debe desactivarse cuando se han completado las tres etapas de la carga. Por consiguiente, se requiere que el generador pueda ser activado y desactivado automáticamente desde el PC.

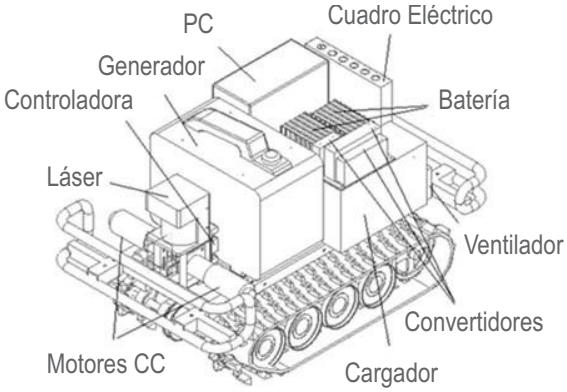


Figura 6: Distribución de los equipos en el nuevo robot.

Se ha seleccionado un generador monofásico (230 V) compacto con potencia nominal de 2200 W y un peso de 27 kg que, como es habitual en generadores ligeros, no incluye una opción de arranque automático. Si bien el generador permite el arranque eléctrico mediante el accionamiento de una llave, la apertura de la válvula de admisión de aire es manual. Así, para automatizar esta operación se propone adaptar el equipo mediante un servo de radio control que accione la válvula mecánicamente (ver Fig. 2). De esta manera, tanto el arranque como el paro del generador se pueden controlar desde el PC mediante tres señales: una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) que controla el desplazamiento angular del eje del servomotor y dos señales digitales para el encendido y apagado del generador, respectivamente, mediante un sistema de relés.

Por otro lado, se posibilita la conexión del cargador de la batería tanto al generador, como a la red eléctrica mediante una clavija de potencia. Gracias a esto, se puede alimentar al robot y cargar las baterías desde una toma de corriente sin necesidad de arrancar el generador.

4. INTEGRACIÓN DE LOS EQUIPOS

El emplazamiento de los nuevos componentes a bordo del robot (ver Fig. 6) se ha diseñado de acuerdo a dos criterios fundamentales: lograr una posición adecuada del centro de masas del sistema y asegurar la ventilación de los equipos en el cuerpo del vehículo.

El generador y las baterías suponen aproximadamente el 70 % de la masa de todos los componen-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

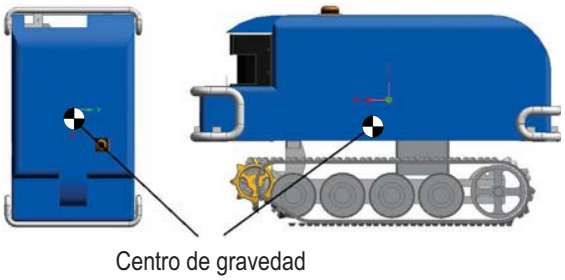


Figura 7: Posición del centro de gravedad

tes. Por ello, su posición es muy relevante para el centro de gravedad del vehículo. En particular, los vehículos con cadenas mejoran su tracción y eficiencia energética si su centro de gravedad (ver Fig. 7) se encuentra próximo al eje longitudinal del vehículo y ligeramente desplazado en el sentido de avance [7].

Con la distribución propuesta, el centro de gravedad se sitúa a una altura de 0.329 m y adelantado 0.074 m respecto del centro geométrico del polígono de apoyo de las cadenas, y con una asimetría lateral de solo 0.006 m. En esta distribución se ha aprovechado la modularidad de las celdas de batería, de manera que se han dispuesto dos cajas (ver Fig. 3) separadas, con nueve y cinco celdas cada una.

Los equipos en el cuerpo del vehículo se encuentran protegidos por una carcasa de fibra de vidrio, como se indica en la Fig. 7. Para facilitar la ventilación en el interior de la carcasa se ha diseñado un sistema de ventilación forzada a partir de un cálculo del valor de flujo volumétrico capaz de evacuar el calor producido por la suma de las pérdidas energéticas de cada uno de los componentes, suponiendo que éstas se traducen enteramente en calor.

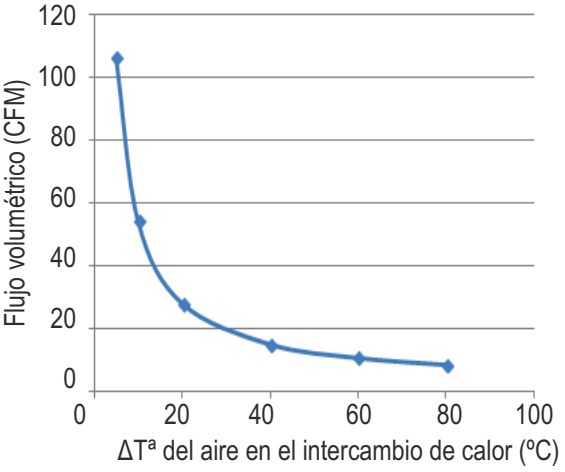


Figura 8: Flujo volumétrico en función de la diferencia de temperatura en el intercambio de calor.

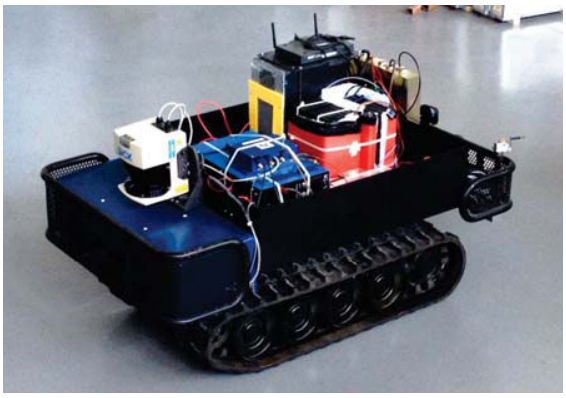


Figura 9: Imagen actual del robot Auriga-α.

Se estima que el calor a evacuar con el generador en funcionamiento es de 240 W, y para condiciones de presión ambiental constante y temperatura intermedia en el intercambio próxima a 30°, el flujo volumétrico en función de la variación de temperatura experimentada en el aire se calcula según la curva de la Fig. 8. Como resultado, se ha incluido un ventilador que fuerza un flujo de aire de 70 CFM alrededor de los equipos. Además, un aspecto que se ha tenido en cuenta para favorecer el intercambio de calor por convección forzada, ha sido disponer los equipos de manera que las caras de mayor superficie queden expuestas al contacto con dicho flujo.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El artículo ha presentado la remodelación del robot móvil Auriga-α. Del vehículo original, desarrollado en el año 2000, solo se ha conservado el sistema de locomoción. Además de la actualización de los sistemas informáticos y equipos de control, el principal objetivo ha sido la conversión del robot en un vehículo híbrido eléctrico.

Para el sistema híbrido de alimentación, se han incorporado baterías $LiFePO_4$ con su correspondiente cargador y un generador monofásico. En el diseño, se han tenido en cuenta el posicionado del centro de gravedad y la ventilación de los equipos. El peso total estimado es de 178 kg, lo que supone una reducción aproximada del 30 %. Además, la altura total ha pasado de 0.92 m a 0.74 m. Asimismo, sólo con el sistema de baterías se estima una autonomía de varias horas para el vehículo en movimiento.

Este diseño se encuentra en proceso de implantación. La Fig. 9 muestra el estado actual del robot (sin la carcasa de protección), donde ya se han instalado los sistemas informáticos, el sistema de po-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tencia, y el conjunto cargador-baterías $LiFePO_4$. Los primeros experimentos muestran una respuesta adecuada del sistema en cuanto a potencia de tracción.

Las observaciones preliminares del proceso de carga de las baterías ha evidenciado diferencias entre las especificaciones del fabricante en cuanto a la caída de tensión en la fase de recuperación. Concretamente, esta caída depende, en porcentaje, de la intensidad máxima de carga. Así, la estimación de modelos fiables de este comportamiento resulta interesante para el desarrollo de estrategias de carga en el sistema híbrido.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por el proyecto CICYT DPI 2011-22443.

Referencias

[1] Wang Jiayuan, Sun Zechang, and Wei Xuezhe. Performance and characteristic research in LiFePO4 battery for electric vehicle applications. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, USA, Sept 2009.

[2] Lixia Liao, Pengjian Zuo, Yulin Ma, Xin-Qun Chen, Yongxin An, Yunzhi Gao, and Geping Yin. Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO4 cathode for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 60:269 – 273, 2012.

[3] D. G. Logan, J. Pentzer, S. N. Brennan, and K. Reichard. Comparing batteries to generators as power sources for use with mobile robotics. *Journal of Power Sources*, 212:130–138, 2012.

[4] J. L. Martínez, A. Mandow, J. Morales, S. Pedraza, and A. García-Cerezo. Approximating kinematics for tracked mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 24(10):867–878, October 2005.

[5] T. D. J. Mateo Sanguino and J. E. González Ramos. Smart host microcontroller for optimal battery charging in a solar-powered robotic vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3):1039–1049, 2013.

[6] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, and A. García-Cerezo. Steering the last trailer as a virtual tractor for reversing vehicles with passive on- and off-axle hitches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12):5729–5736, 2013.

[7] J. Morales, J. L. Martínez, A. Mandow, A. J. García-Cerezo, and S. Pedraza. Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5):1098 –1108, 2009.

[8] Salvador Pedraza. *Modelado y análisis de vehículos de cadenas para navegación autónoma*. PhD thesis, Universidad de Málaga, Málaga, 2000.

[9] Y. Takahashi, S. Matsuo, and K. Kawakami. Hybrid robotic wheelchair with photovoltanic solar cell and fuel cell. In *International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 1636–1640, Seoul, Korea, 2008.

[10] Ching-Kuo Wang, Han-Pang Huang, and Wei-Fu Huang. Loading evaluation of the power scheduling system on the industrialized robot platform. In *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 326–329, Taipei, Taiwan, 2011.

[11] G. Wang, Z. Dai, Y. Guan, P. Dong, and L. Wu. Power management of hybrid power systems with Li-Fe batteries and supercapacitors for mobile robots. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 2014.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CRITERIOS PARA RESOLUCIÓN DE REDUNDANCIA EN CONTROL VISUAL DIRECTO DE MANIPULADORES

Javier Pérez, Jorge Pomares, Gabriel J. García, Carlos A. Jara, Fernando Torres
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, San Vicente del Raspeig, CP: 03690
Universidad de Alicante
{jpalepuz, jpomares, gjgg, carlos.jara, fernando.torres}@ua.es

Resumen

En este artículo se describe la formulación de un sistema de control visual directo para el guiado de robots redundantes empleando visión artificial. Partiendo de los conceptos de manipulabilidad y perceptibilidad, se proponen nuevos criterios con el objetivo de que el método de resolución de redundancia evite singularidades tanto del robot como en la imagen. Los resultados obtenidos muestran cómo uno de los criterios definidos es capaz de detectar dichas singularidades y determinar la dirección de movimiento más adecuada en el espacio imagen.

Palabras Clave: Control visual, perceptibilidad, redundancia.

1 INTRODUCCIÓN

Recientemente, los nuevos manipuladores robóticos industriales incluyen estructuras cinemáticas redundantes para afrontar tareas complejas y/o múltiples en entornos dinámicos y/o no estructurados. Esta redundancia permite a sistemas robóticos con gran cantidad de grados de libertad (gdl) alcanzar configuraciones articulares complejas lo que les da más flexibilidad durante la realización de tareas. Los sistemas de producción actuales presentan requisitos cada vez más restrictivos no sólo debido a la velocidad de producción necesaria sino también a la complejidad y precisión de los movimientos a realizar. Estos aspectos han centrado el diseño de estructuras articulares redundantes [1][10]. Sin embargo, controlar un sistema redundante llevando a cabo este tipo de tareas incluye no sólo el correcto movimiento del extremo del robot, sino también conseguir unos movimientos articulares estables y correctos. Este artículo presenta criterios para la resolución de redundancia en tareas de control visual directo. El control clásico basado en imagen determina las velocidades de la cámara requeridas para posicionar el robot con respecto a un objeto de referencia [2]. Al usar esta aproximación, el controlador interno del robot computa los pares articulares para conseguir las velocidades de la cámara previamente mencionadas. Sin embargo, en este artículo, un controlador basado en control visual directo es utilizado para controlar el movimiento del robot. A través del control visual directo, el bucle interno de control de los servo-motores se elimina y el control visual directo es utilizado para estabilizar el robot [5]. El resultado es un control más preciso que reacciona más rápidamente a cambios abruptos en las trayectorias en imagen.

El control de sistemas redundantes ha sido un tema de investigación en los últimos años, donde varios autores han propuesto diferentes algoritmos de control que tienen en cuenta la dinámica del robot. Es importante destacar el trabajo presentado por Khatib [4], que propone un esquema de control dinámico para robots redundantes usando la pseudo-inversa de la matriz Jacobiana. Otros trabajos como los presentados por Xian [12] y Zergeroglu [14], están basados en controladores no lineales que aseguran un seguimiento asintótico en el espacio Cartesiano. Tatlicioblu [11] y Lin [6] presentaron la aplicación de otro tipo de controladores basados en control óptimo y adaptativo en la planificación de la trayectoria. Otras aproximaciones recientes se han concentrado en tecnologías de redes neuronales debido a sus capacidades de aprendizaje y computación paralela. En este campo, la mayoría de las contribuciones se encargan de compensar las no-linealidades [6] y las incertidumbres del sistema [5]. Las aproximaciones anteriormente mencionadas se basan en control de posición, orientación y/o velocidad durante el seguimiento de trayectorias. Sin embargo, como se ha indicado previamente, el controlador propuesto en este artículo empleará

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

información en imagen para cerrar el bucle de control. Además, se describen criterios capaces de detectar simultáneamente singularidades en el espacio cartesiano del robot y en el espacio de la imagen. Estos criterios podrán emplearse para resolver la redundancia del robot.

El artículo se ha organizado de la siguiente manera. En el Apartado 2 se describe la estrategia de control visual básica empleada y en el Apartado 3 se muestra su extensión al control visual directo. En el Apartado 4 se describen los índices propuestos para la resolución de redundancia para en el Apartado 5 describir los resultados obtenidos al aplicar dichos índices.

2 CONTROL VISUAL

En esta sección se describirá la aproximación básica de control visual empleada para el guiado del robot en el espacio imagen. Para ello, en primer lugar se describirá la notación empleada. Se considera $\mathbf{q} \in \Re^{nx1}$ como el conjunto de posiciones articulares, $\dot{\mathbf{q}} \in \Re^{nx1}$ representa el vector de velocidades articulares y $\ddot{\mathbf{q}} \in \Re^{nx1}$ son las aceleraciones articulares (se considera un robot con n articulaciones de rotación). Como se ha indicado anteriormente, el robot es guiado haciendo uso de información visual. De manera general, esta información visual es representada en forma de vector con k puntos característicos en imagen $\mathbf{s} = \left[f_{1x},\ f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}, \dots, f_{kx}, f_{ky}\right]^T \in \Re^{2k}$.

La siguiente relación se establece con la matriz de interacción $\mathbf{L}_s$ [2]:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s(\mathbf{r}_c)\dot{\mathbf{r}}_c \tag{1}$$

donde $\dot{\mathbf{s}}$ es la derivada de las características en imagen, $\mathbf{r}_c$ representa la posición y orientación de la cámara localizada en el extremo del robot y $\dot{\mathbf{r}}_c$ es la correspondiente velocidad. El extremo del robot desarrolla un seguimiento en un espacio m-dimensional, por lo que la posición y orientación de éste es $\mathbf{r}_c \in \Re^m$. La Jacobiana del robot relaciona la velocidad del extremo con la velocidad en el espacio articular $\dot{\mathbf{q}}$:

$$\dot{\mathbf{r}}_c = \mathbf{J}_r(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \tag{2}$$

De (1) y (2) se puede establecer la siguiente relación entre el espacio en imagen y el espacio articular del robot:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s(\mathbf{r}_c)\mathbf{J}_r(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \tag{3}$$

donde $\mathbf{L}_s(\mathbf{r}_c)\mathbf{J}_r(\mathbf{q}) \in \Re^{2kxn}$ y que, por simplificación, a partir de ahora se denominará $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ por lo que la Ecuación (3) quedaría como $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$. Derivando esta última expresión con respecto al tiempo se obtiene la siguiente relación:

$$\ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} \tag{4}$$

donde $\ddot{\mathbf{s}}$ denota la aceleración en imagen y $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ se ha sustituido por $\mathbf{J}$ para una mejor lectura. En este artículo se propone un controlador basado en aceleración para el espacio articular, por tanto, las aceleraciones articulares que se denotan como $\ddot{\mathbf{q}}$ en (4) se harán a partir de ahora como $\ddot{\mathbf{q}}_r$ para representar las aceleraciones calculadas que serán aplicadas al controlador.

Dos tareas diferentes son definidas para llevar a cabo la tarea de control visual teniendo en cuenta la redundancia del robot:

- Tarea primaria: Esta tarea consiste en el guiado del robot (en este caso el posicionamiento desde la posición inicial a la final en el espacio imagen). A esta tarea se le asigna la más alta prioridad.
- Tarea secundaria: Aprovechando la redundancia del robot, una tarea secundaria puede ser establecida de manera que sólo se llevará a cabo cuando se consiga un correcto seguimiento (tarea primaria).

Para realizar las dos tareas simultáneamente, las aceleraciones requeridas $\ddot{\mathbf{q}}_r$ se pueden obtener a partir de (4), asegurando, por tanto, un correcto seguimiento:

$$\ddot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}^+(\ddot{\mathbf{s}}_r - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \tag{5}$$

donde $\mathbf{J}^+$ es la pseudoinversa de la Jacobiana del robot y $\ddot{\mathbf{s}}_r$ es la referencia de la aceleración en el espacio imagen. Sin embargo, esta última ecuación no considera la resolución de la redundancia. La idea básica para conseguirla a nivel de aceleración es computar las aceleraciones articulares deseadas integrando la tarea secundaria en el espacio nulo de $\mathbf{J}$. Esta última aproximación se consigue al emplear la expresión:

$$\ddot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}^+\left(\ddot{\mathbf{s}}_r - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}\right) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+\mathbf{J}) \cdot (-\mathbf{K}_{Dp}\dot{\mathbf{q}} - \alpha\nabla\mathbf{u}) \tag{6}$$

donde el parámetro α es una ganancia positiva e $\mathbf{I} - \mathbf{J}^+\mathbf{J}$ proyecta el gradiente de $\mathbf{u}$ (con un término de amortiguamiento en el espacio articular $-\mathbf{K}_{Dp}\dot{\mathbf{q}}$) en el espacio nulo de la Jacobiana $\mathbf{J}$, donde $-\mathbf{K}_{Dp} > 0$. En el Apartado 4, se estudiarán diferentes funciones de coste para intentar solucionar la redundancia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La referencia de aceleración en el espacio en imagen $\ddot{\mathbf{s}}_r$ que permite realizar el seguimiento se obtiene como:

$$\ddot{\mathbf{s}}_r = \ddot{\mathbf{s}}_d + \mathbf{K}_D(\dot{\mathbf{s}}_d - \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{K}_P(\mathbf{s}_d - \mathbf{s}) = \\ = \ddot{\mathbf{s}}_d + \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P\mathbf{e} \quad (7)$$

donde $\ddot{\mathbf{s}}_d$, $\dot{\mathbf{s}}_d$ y $\mathbf{s}_d$ son las aceleraciones, velocidades y posiciones deseadas, respectivamente, en el espacio de la imagen. $\mathbf{K}_P$ y $\mathbf{K}_D$ son las matrices de ganancia del controlador PD. Además, $\mathbf{e}_s = \mathbf{s}_d - \mathbf{s}$ es el error en imagen, $\dot{\mathbf{e}}_s = \dot{\mathbf{s}}_d - \dot{\mathbf{s}}$ es la derivada del error en imagen y $\ddot{\mathbf{e}}_s = \ddot{\mathbf{s}}_d - \ddot{\mathbf{s}}$ representa el error en aceleración o la segunda derivada del error en imagen.

3 CONTROL VISUAL DIRECTO

En sistemas clásicos de control visual, el extremo del robot o las velocidades articulares son obtenidas para posicionar la cámara con respecto a un objeto de referencia. Una vez que se obtienen estas velocidades, el controlador interno del robot genera los pares articulares necesarios para conseguir las velocidades generadas. En este artículo, el uso de una aproximación de control visual directo permite al sistema generar las fuerzas y pares a aplicar en las articulaciones del robot para llevar a cabo las tareas priorizadas descritas en el Apartado 2. Al usar este tipo de controlador el seguimiento puede ser llevado a cabo de una forma más precisa y el sistema reacciona más rápidamente a cambios abruptos en la trayectoria.

Utilizando la Ecuación (6) se obtienen las aceleraciones articulares requeridas para llevar a cabo el posicionamiento del robot a través de las características en la imagen. La acción de control para controladores en el espacio operacional basados en aceleración puede ser descrita como:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (8)$$

donde $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \Re^{nxn}$ es la matriz de inercia del manipulador, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \Re^{nx1}$ es el vector de pares centrípetos y de Coriolis y $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ es la fuerza gravitacional. Finalmente, $\boldsymbol{\tau} \in \Re^{nx1}$ es el vector de pares articulares aplicados. De (8) y (6), el controlador visual directo resultante es:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})[\mathbf{J}^+(\ddot{\mathbf{s}}_r - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+\mathbf{J}) \cdot (-\mathbf{K}_{Dp}\dot{\mathbf{q}} \\ - \alpha\nabla\mathbf{u})] + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (9)$$

4 RESOLUCIÓN DE REDUNDANCIA

En este apartado se presentan funciones de coste para la resolución de la redundancia a nivel de aceleración teniendo en cuenta que se está empleando una estrategia de control visual directo. Al igual que en el presente artículo, en [3] se describe cómo múltiples tareas pueden ser controladas de forma jerárquica. Este último trabajo presenta una resolución de redundancia basada en prioridad a nivel de velocidad. Este método selecciona una tarea como primaria y proyecta las otras tareas (secundaria, terciaria…) en el espacio nulo de la derivada de la tarea primaria. Haciendo uso de la aproximación descrita en el apartado anterior, el método presentado en [3] es extendido para llevar a cabo una resolución de redundancia a nivel de aceleración. La manipulabilidad [13] define un valor escalar que determina la capacidad de movimiento de un manipulador. Este valor escalar viene dado por:

$$\omega = \sqrt{\det(\mathbf{J}_r(\mathbf{q})\mathbf{J}_r^T(\mathbf{q}))} \quad (10)$$

Considerando un conjunto de velocidades articulares con forma unitaria $\dot{\mathbf{q}}^T\dot{\mathbf{q}}$ que corresponde a la superficie de una hiper-esfera en el espacio de velocidades articulares de N-dimensiones y sustituyendo en (2) se obtiene:

$$\dot{\mathbf{r}}_c^T(\mathbf{J}_r(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{J}_r^T(\mathbf{q}))^{-1}\dot{\mathbf{r}}_c = 1 \quad (11)$$

que es la ecuación de puntos en la superficie de un elipsoide de 6 dimensiones en el espacio de velocidades del extremo del robot, cuyo volumen viene determinado por el valor escalar ω.

Relacionado con la manipulabilidad se define el concepto de perceptibilidad [3], ω_L, que en este caso depende de la matriz de interacción $\mathbf{L}_s$ y los datos obtenidos en la imagen. Este último criterio permite cuantificar el grado en el que la cámara es capaz de percibir movimiento de objetos dentro de su campo de visión. En nuestros trabajos previos [8] se describen cómo puede emplearse la perceptibilidad como función de coste para la resolución de redundancia. A continuación, se extenderá este criterio de perceptibilidad presentando dos nuevas funciones de coste para la resolución de la redundancia a nivel de aceleración (ver Ecuación (6)) teniendo en cuenta que se está empleando una estrategia de control visual directo. Estas funciones son:

$$\omega_J = \sqrt{\det\left(\mathbf{L}_s\mathbf{J}_r\mathbf{J}_r^T\mathbf{L}_s^T\right)} \\ \omega_M = \sqrt{\det\left(\mathbf{L}_s\mathbf{J}_r\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}^{-T}\mathbf{J}_r^T\mathbf{L}_s^T\right)} \quad (12)$$

La primera de las expresiones emplea la matriz **J** definida en la Ecuación (3) mientras que la segunda tiene en cuenta la matriz de inercias. En el apartado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de resultados se evaluará el valor de ambos índices en distintas situaciones. Esto permitirá determinar su utilidad de cara a la resolución de redundancia.

5 RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar las funciones de coste indicadas en la Ecuación (12), en este apartado se describen tres experimentos en los que se producen distinto tipo de singularidades. De forma similar a como se indicó en el Apartado 4 para la manipulabilidad, para cada experimento se detallarán las elipses en el espacio imagen que se obtendrían al aplicar las funciones de coste propuestas durante cada uno de los experimentos. Esto permitirá comprobar la dirección de movimiento establecida por cada función en el espacio imagen ante cada situación y, de esta manera, determinar si dichas funciones de coste son capaces de detectar las situaciones de singularidad ilustradas en cada experimento.

5.1 EXPERIMENTO 1

En este experimento el robot se desplaza desde la posición inicial hasta la final pasando por una posición cercana a una singularidad. En la Figura 1 se representan las características deseadas en la imagen consideradas para este experimento. Se lleva a cabo la tarea de control visual y el robot empieza a desplazarse hacia atrás desde la posición inicial mostrada en la Figura 2 hasta alcanzar la posición indicada en la Figura 4 en la que se observan las características deseadas. En ambas figuras se ha representado con cruces azules la ubicación de los puntos característicos que son extraídos por la cámara situada en el extremo del robot. A lo largo de esta trayectoria, el robot pasa por una configuración cercana a una singularidad tal y como se muestra en la Figura 3.

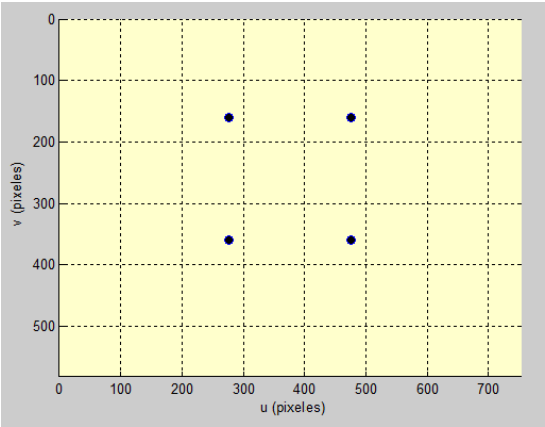


Figura 1: Características deseadas. Experimento 1.

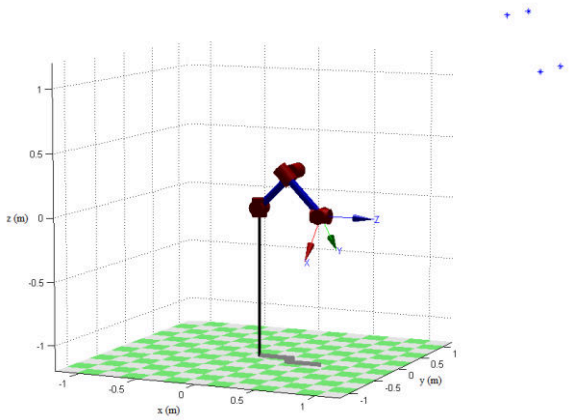


Figura 2: Posición inicial. Experimento 1

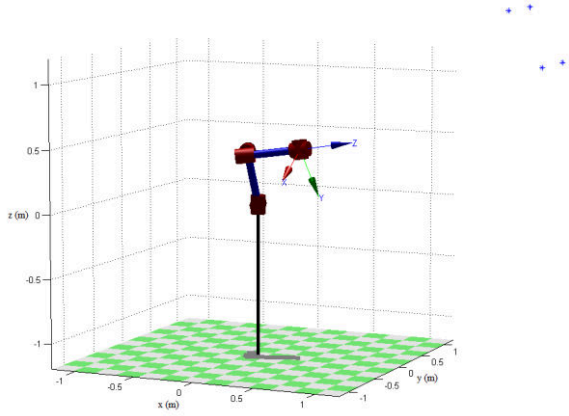


Figura 3: Posición cercana a singularidad articular. Experimento 1

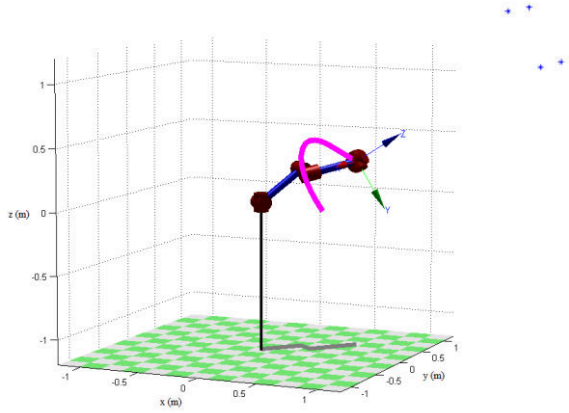


Figura 4: Posición final. Experimento 1

Las Figura 5 muestra las elipses resultantes al aplicar las funciones de coste ω_L y ω_J, respectivamente, en cada ciclo de muestreo. Como se puede observar en la figura, los resultados en ambos casos son similares. En la Figura 6 se han representado las elipses en el espacio imagen obtenidas al aplicar ω_M . En esta última figura se puede observar cómo el volumen de las elipses se va reduciendo conforme el robot se acerca a la configuración singular

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

comparando con ω_L y ω_J, para después incrementar de nuevo una vez pasada dicha configuración. En esta última figura se ha resaltado la zona cercana a la singularidad. Se comprueba, por lo tanto, que empleando el criterio ω_M el sistema es capaz de detectar la singularidad del robot. Además, estas elipses determinan la dirección de movimiento adecuado en el espacio imagen para evitar las singularidades y así poder emplearse para la resolución de redundancias tal y como se indicó en el Apartado 4.

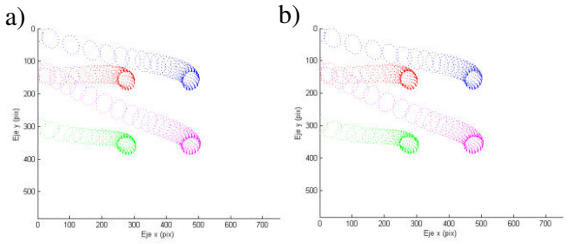


Figura 5: Representación elipses a) ω_L y b) ω_J

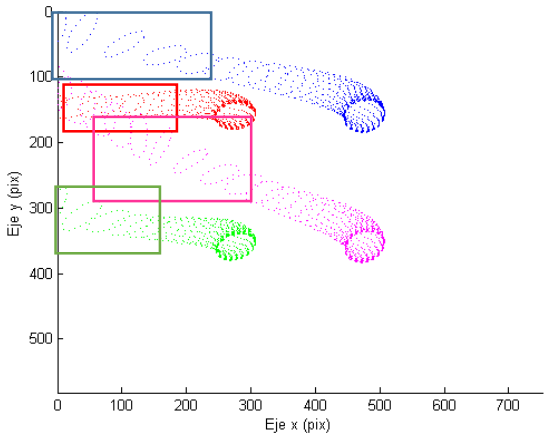


Figura 6: Representación elipses ω_M

5.2 EXPERIMENTO 2

En el segundo experimento se muestra el resultado de obtener una singularidad articular al posicionar el patrón de características deseadas fuera del alcance de trabajo del robot. En la Figura 7 se han representado las características iniciales y deseadas consideradas en este experimento.

El robot parte de la configuración articular mostrada en la Figura 8 y el extremo se mueve en dirección al patrón hasta alcanzar el límite de trabajo y, por tanto perder grados de libertad al posicionarse totalmente extendido como se muestra en la Figura 9.

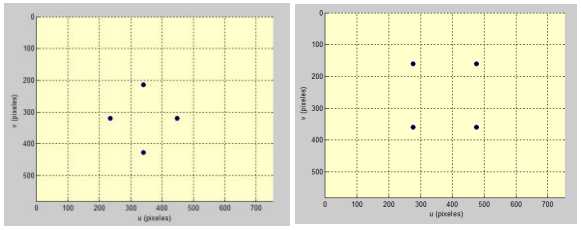


Figura 7: Características iniciales y deseadas. Experimento 2.

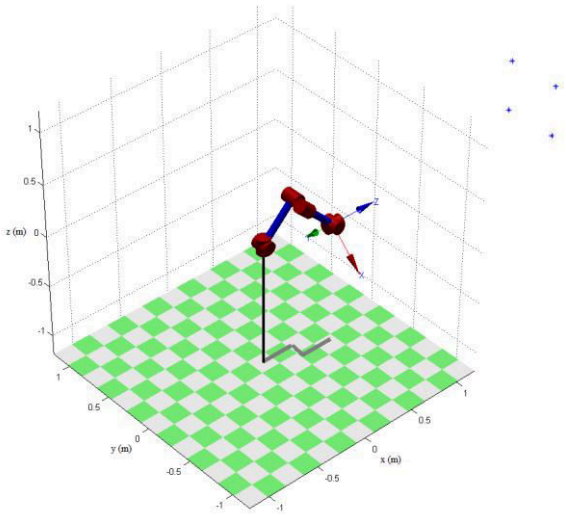


Figura 8: Posición inicial experimento 2

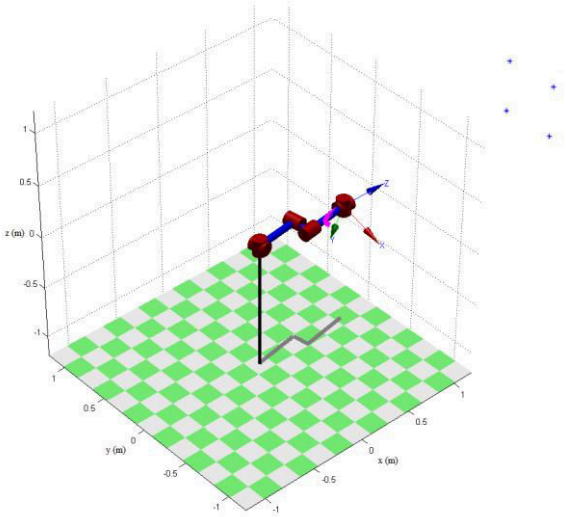


Figura 9: Posición final experimento 2

De nuevo, la Figura 10 muestra el resultado de aplicar las funciones de coste ω_L y ω_J, respectivamente, donde los puntos azules indican la posición de la que parten los ciclos de captura, y los resultados en ambos casos vuelven a ser similares. Sin embargo, al aplicar ω_M, en la Figura 11 se puede observar cómo el volumen de las elipses se va reduciendo conforme el extremo de robot alcanza la posición singular.

a) b)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

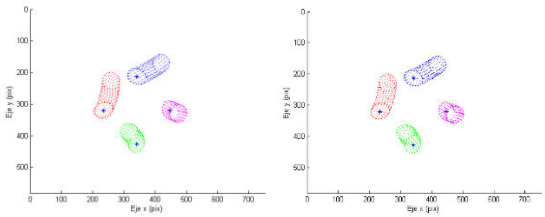


Figura 10: Representación elipses a) ω_L y b) ω_J

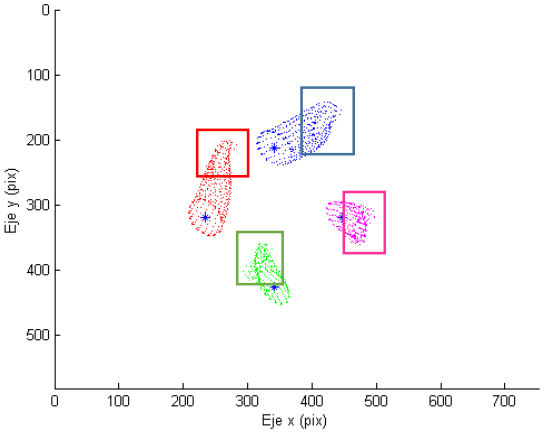


Figura 11: Representación elipses ω_M

5.3 EXPERIMENTO 3

En el tercer experimento se estudia el caso descrito en [2] de singularidad en imagen al rotar el patrón 180º. En la Figura 12 se han representado las características iniciales y deseadas consideradas en este experimento.

El robot parte de la configuración articular que se puede observar en la Figura 13 y al realizar el guiado con control visual, se determina que el extremo del robot debe desplazarse en dirección opuesta al patrón, alcanzando de nuevo una posición articular singular como se muestra en la Figura 14.

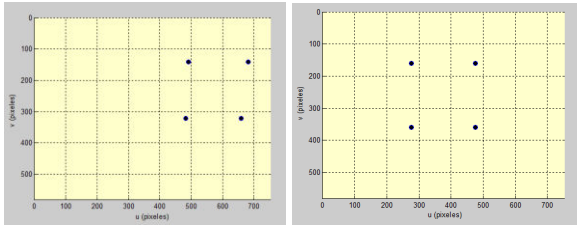


Figura 12: Características iniciales y deseadas. Experimento 3.

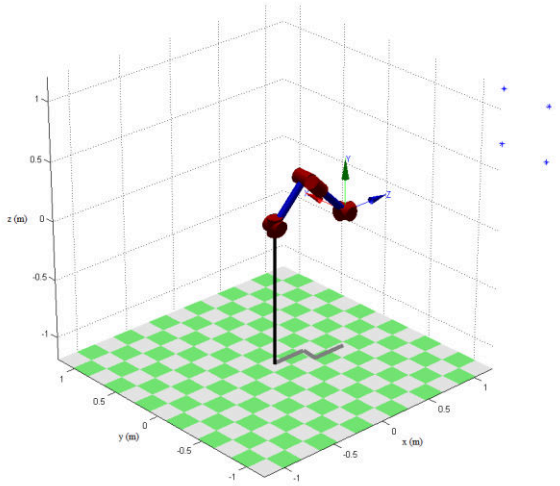


Figura 13: Posición inicial Experimento 3

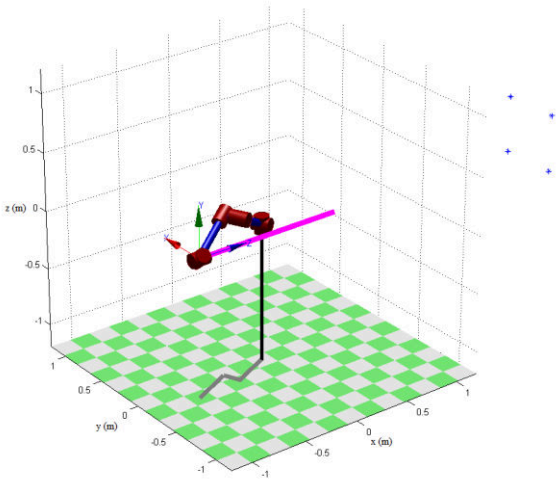


Figura 14: Posición final Experimento 3

La Figura 15 muestra el resultado de aplicar las funciones de coste ω_L y ω_J, respectivamente, donde los puntos azules indican la posición de la que parten los ciclos de captura, y los resultados en ambos casos, una vez más, vuelven a ser similares. De nuevo, al aplicar ω_M, en la Figura 16 se puede observar cómo el tamaño de las elipses se va reduciendo conforme el extremo de robot se va alejando del patrón. El volumen de las elipses no llega a ser cero porque para darse el caso de singularidad en imagen, la distancia de la cámara con respecto al patrón debería ser infinita, y sin embargo se produce antes una singularidad articular al alcanzar el límite del espacio de trabajo del robot.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

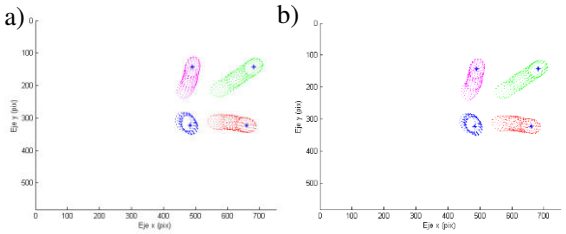


Figura 15: Representación elipses a) ω_L y b) ω_J

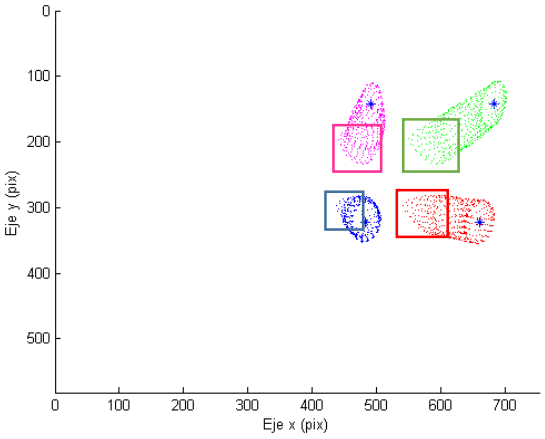


Figura 16: Representación elipses ω_M

6 CONCLUSIONES

En este artículo se han descrito distintos criterios para la resolución de redundancias aplicables a sistemas de control visual directo basados en imagen. Tras la formulación genérica de este tipo de sistemas se han descrito varios índices basados en el concepto de perceptibilidad. Para el análisis de estos índices se ha hecho uso de las elipses resultantes en el espacio imagen. Dichas elipses captan la capacidad de movimiento en el espacio imagen dada la configuración del robot. Del análisis realizado se ha concluido que, haciendo uso del índice ω_M, es posible detectar no sólo singularidades del robot sino también singularidades en el espacio imagen. Además, la información que proporciona es posible integrarla en un controlador visual directo con el propósito de resolver la redundancia del robot evitando, de esta manera, la presencia de singularidades.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y los fondos Europeos FEDER (DPI2012-32390), la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2013/085) y la Universidad de Alicante (GRE12-17).

Referencias

[1] Andolfatto L., Lavernhe S., Mayer JRR., (2011) "Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 51, pp. 787–96

[2] Chaumette, F., Hutchinson, S., (2006) "Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 82-90.

[3] Gans, N., R., Hu, G., Dixon, W., W., (2008) "Keeping objects in the field of view: an undertermined task function approach to visual servoing". IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 432 – 437.

[4] Khatib, O., (1983) "Dynamic Control of Manipulators in Operational Space," Proceedings of the 6th IFTOMM Congress on Theory of Machines and Mechanisms, pp. 1–10.

[5] Kumar, N., Borm, J., Panwar, V. and Chai, J., (2012) "Tracking control of redundant robot manipulators using RBF neural network and an adaptive bound on disturbances," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, No. 8, pp 1377-1386.

[6] Lin, C. J., (2004) "Motion Planning of Redundant Robots by Perturbation Method," *Mechatronics*, vol. 14, pp. 281–297.

[7] Nakanishi, J., Cory, R., Mistry, M., Peters, J. and Schaal, S., (2008) "Operational Space Control: A Theoretical and Empirical Comparison,". *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, No. 6, pp. 737-757.

[8] Pomares, J., Perea, I., Torres, F., (2014) "Dynamic Visual Servoing With Chaos Control for Redundant Robots". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 423-431.

[9] Pomares, J., Corrales, J. A., Garcia, G. J., Torres, F., (2011) "Direct Visual Servoing to Track Trajectories in Human-Robot Cooperation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, No. 4, pp. 129-138.

[10] Song, W., Wang, G., Xiao, J., Wang, G., Hong, Y., (2012) "Research on multi-robot open architecture of an intelligent CNC system based on parameter-driven technology," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, pp. 326–333.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[11] Tatlicioglu, E., Braganza, D., Burg, T. C., Dawson, D. M., (2009) "Adaptive Control of Redundant Robot Manipulators with Sub-Task Objectives," *Robotica*, Vol. 27, pp. 873–881.

[12] Xian, B., Queiroz, M., Dawson, D., Walker, I., (2001) "Task Space Tracking Control of Redundant Robot Manipulators via Quaternion Feedback," Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 363–368.

[13] Yoshikawa, T., (2000) "Manipulability of Robotic Mechanisms", *International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9.

[14] Zergeroglu, E., Dawson, D. M., Walker, I., Behl, A., (2000) "Nonlinear Tracking Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators," Proceedings of the American Control Conference, pp. 2513–2517.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

EQUIPO PARA PRÁCTICAS DE FUNDAMENTOS DE AUTOMÁTICA

A.V. Poncela, Eduardo J. Moya de la Torre, F. Javier García Ruíz, D. Martínez
(ITAP) Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Ing. de Sistemas y Automática, EII, Paseo del Cauce 59, Valladolid, 47011, España, poncela@eii.uva.es, edumoy@eii.uva.es

Resumen

En este trabajo se muestran detalles del equipo materializado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA) de la Escuela de Ingenierías Industriales (EII) de la Universidad de Valladolid (UVa) para la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura Fundamentos de Automática presente en los Grados de Ingeniería Industrial (conforme a las directrices Bolonia y adaptada al EEES), de las titulaciones impartidas en la EII de la UVa por cientos de alumnos.

Se diseñó y montó el prototipo inicial y en base al conocimiento adquirido, problemas surgidos y solventados, se procedió a la fabricación, en las propias dependencias del departamento, de un total de veinticuatro equipos.

En la maqueta encontramos dos elementos bien diferenciados. Por una parte se tiene el hardware que incluye el sistema a controlar y los medios para su contro y por otro lado el interfaz de usuario que permite la interacción usuario-equipo.

Palabras Clave: Control Automático, Sistemas realimentados, Maqueta, Motores, Control PID, VB.NET, HMI, dsPIC.

1 INTRODUCCIÓN

El campo de la ingeniería de control es muy amplio y cada vez abarca más áreas como pueden ser la bioingeniería o la economía ya que permite reconocer, interpretar y modificar el estado de los sistemas en el futuro. Un ingeniero de control [1] ha de ser capaz de modelar, diseñar, simular, implementar y sintonizar adecuadamente un sistema. Algunas de estas habilidades pueden aprenderse a través de libros y simulaciones. Sin embargo, el mejor modo de comprender el funcionamiento de un sistema y las leyes que lo regulan es a través de la experimentación en el mundo real.

El cuaderno de cargas del proyecto inicial fue (curso 2011-12): (1) construir un equipo robusto; (2) de coste asequible para un volumen alto de equipos; (3) portátil y trasladable ; (4) mantenible por el propio Departamento sin dependencia externa; (5) para ser almacenado en espacio reducido, es decir sin bloquear espacio para otros usos/asignaturas; (6) utilizable en aulas informáticas convencionales, es decir sin espacio dedicado; y (7) llegado el caso "prestable" a los estudiantes para trabajo en casa.

Se diseñó y montó el prototipo inicial y en base al conocimiento adquirido, problemas surgidos y solventados, se procedió a la fabricación, en las propias dependencias del departamento, de un total de veinticuatro equipos (20 para uso en sesiones de laboratorio, 2 para profesor y 2 de repuesto).

Junto al equipo físico "maqueta" se elaboraron los guiones de prácticas (tres), ajustados a los contenidos de la citada asignatura (obligatoria de 4.5 ECTS, segundo curso, segundo cuatrimestre para todas las titulaciones de Grado, ver detalles página web al final).

La maqueta consta de dos elementos bien diferenciados. Por una parte se tiene el hardware que incluye el sistema a controlar (motor, reductora y carga) y los medios para su control: sensores, etapa de potencia basada en puente H y controlador a partir de microcontrolador dsPIC30F4012 [2]; y por otro lado el interfaz de usuario que permite la interacción amigable entre el usuario y el equipo.

El interfaz se ha desarrollado en VB.NET de tal suerte que puede ser empleado en salas informáticas convencionales compatible con los diferentes sistemas operativos Windows y configuraciones que hardware que existen habitualmente en ellas. Los guiones de prácticas dirigen a los alumnos hacia experimentos de modelado, control de velocidad PI con antiwindup y control de posición PID.

En todas las prácticas existe un trabajo previo a realizar en casa antes de acudir a la sesión en el laboratorio, donde se validará en la medida de lo posible la teoría con la realidad y se verá el funcionamiento de un sistema tangible, no simulado.

Un sistema de control consta, en su forma más básica, de un conjunto de sensores y actuadores que pueden ser leídos y manipulados respectivamente

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mediante un PLC/ Ordenador/ Microcontrolador, y una interfaz gráfica (pantalla, teclado) para dialogar con el usuario. Siguiendo este esquema, se han diseñado y materializado dos elementos, (1) la planta del sistema (maqueta) que ha sido llamada Motorpiic, y (2) el interfaz gráfico, al que se ha llamado Autopiic. para resolver la comunicación hombre-máquina (HMI, MMI).

Mediante la maqueta se realizan tres experimentos proporcionando al alumno visión práctica de la teoría mostrada en las sesiones teóricas, para afianzar conocimientos, y permiten al profesor la evaluación de los mismos.

El artículo está organizado de la manera siguiente. Aquí se hace una introducción sobre la necesidad y justificación del trabajo a desarrollar. En la segunda sección se hace una breve descripción del hardware correspondiente a la versión tercera del prototipo explicado (motorpiic), tanto en su etapa de control como de potencia. En la tercera sección se presenta la programación del software necesario para funcionamiento y control de la maqueta. En la cuarta sección se presenta el interfaz gráfico, al que se ha llamado Autopiic. En la quinta sección se describen los experimentos realizados para las practicas en las cuales los alumnos adquieran las competencias necesarias para el conocimiento inicial de los sistemas de control continuos. En la sexta sección se presentan los resultados académicos obtenidos en los últimos cursos. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas y las líneas de trabajo planteadas en un futuro inmediato, así como las referencias bibliográficas utilizadas.

2 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE MOTORPIIC

La Maqueta, Figuras 1, 2 y 3, consta de base (dos piezas y apoyos con nivelador y aislante), fuente de alimentación (12..24Vcc), etapa de potencia basada en puente H, etapa de control gobernada por microcontrolador dsPIC30F4012, motor de corriente continua (0..12Vcc) con encoder magnético incremental de 64 pasos por revolución de eje motor, una primera reductora 1:50, y volante de inercia acoplable/desacoplable (segunda reductora 1:2) suprimiendo la correa entre el eje de la primera reductora y el del volante de inercia.

El sistema se complementa un potenciómetro que se emplea tanto para trabajo en lazo abierto como para trabajo en lazo cerrado. Adicionalmente es necesario un cable conversor RS232-USB [3] para el diálogo con el PC asociado.

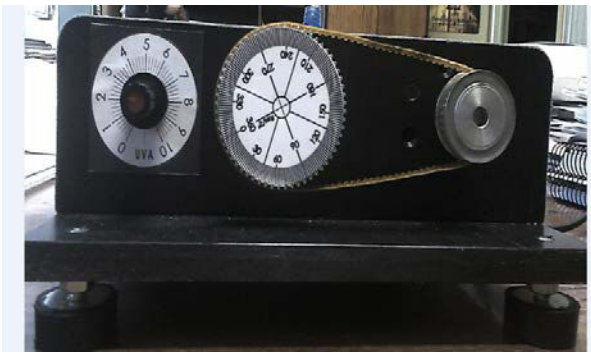


Figura (1): Maqueta v03 Vista frontal

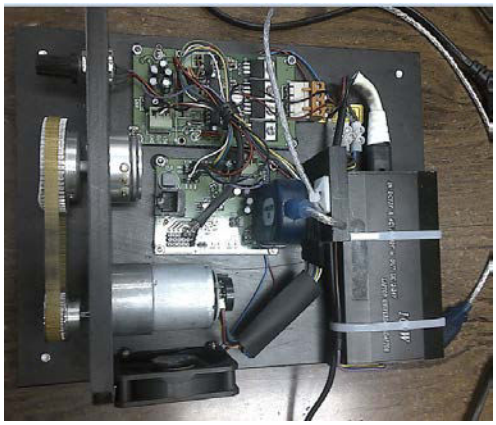


Figura (2): Maqueta v03.Vista superior

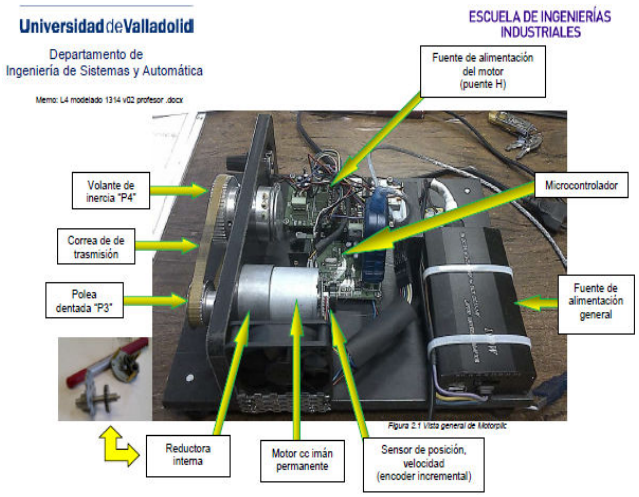


Figura (3): Maqueta v03. Elementos

2.1- ETAPA DE CONTROL MOTORPIIC

La tarjeta control incluye el dsPIC4012, todas las señales lógicas y los acondicionadores para hacer trabajar el conjunto.

Las Figuras 4 y 5 muestran dicha tarjeta y en la tabla 1 se resumen los aspectos relacionados con el sistema aquí desarrollado.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

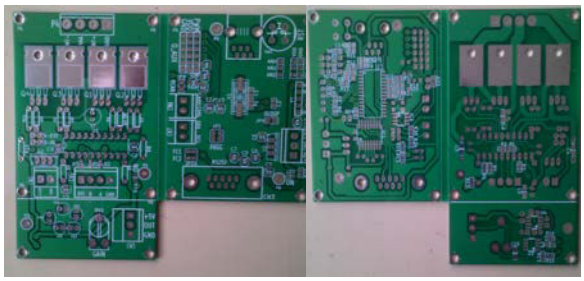


Figura (4): Tarjetas electrónicas de la Maqueta

El dsPIC30F4012 de Microchip [4] posee un núcleo RISC con arquitectura mejorada e incluye la estructura operativa común a los microcontroladores del mismo fabricante MCU junto con un bloque que caracteriza a los Procesadores Digitales de Señal, DSP, y que está destinado a hacer operaciones numéricas a muy alta velocidad.

En el encapsulado SOIC con montaje superficial de 28 patillas dispone de 20 entradas o salidas más que suficientes para la tarea a realizar. Sus principales periféricos son: temporizadores, un conversor A/D, módulos de captura, de comparación, un módulo interfaz de codificador incremental y módulos de comunicación: I2C, SPI, CAN y UART.

Se ha programado para trabajar con reloj externo, porque el oscilador RC interno resulta inexacto, y se ha ajustado el PLL hasta conseguir una frecuencia de 80MHz ejecutando hasta 20 millones de operaciones por segundo, MIPS.

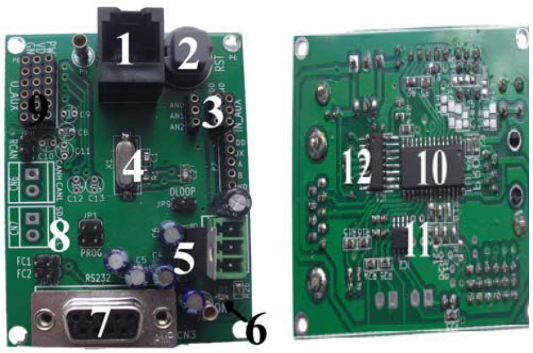


Figura (5): Tarjeta CPU - Caras superior e inferior

Tabla 1: Elementos de la tarjeta

Nº	Descripción
1	Conector RJ11 para conexión con ICD2.
2	Botón de reset.
3	Entradas analog. y conector del encoder incremental
4	Oscilador a 10 MHz.
5	Regulador de tensión de 12V a 5V.
6	Led de encendido.
7	Conector UART o RS232 hembra.
8	Jumpers de programación.
9	Salidas digitales y de PWM.
10	dsPIC4012
11	MCP2551
12	MAX232

Las entradas de las fases A y B del encoder incremental se han acondicionado mediante resistencias de Pull-up. Cabe indicar que en el regulador de tensión de 12V a 5V no se han apreciado calentamientos durante el desarrollo de las pruebas por lo se ha descartado incluir un radiador al diseño.

2.2- ETAPA DE POTENCIA MOTORPIIC

En la etapa de potencia, Figura 6, se ubican además de un puente H basado en IC MOSFETs y manejado por el driver HIP4081, un regulador de tensión de 12V y el sensor de la corriente circulante por el puente.

El HIP4081 se encarga del control de los MOSFETs del puente H teniendo en cuenta el estado de los Mosfet inferiores para ordenar el disparo de los que se encuentran en la rama opuesta superior.

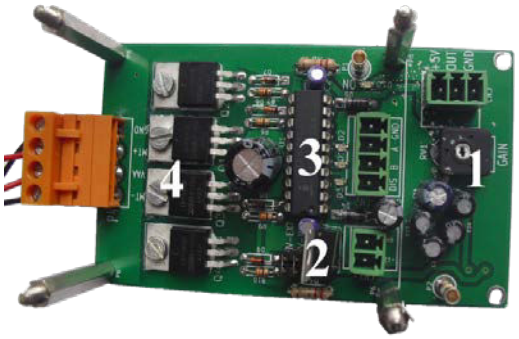


Figura (6): Cara superior de la etapa de potencia

La distribución de componentes se recoge en la Tabla 2.

Tabla 2: Distribución de componentes

	Descripción
1	Potenciómetro del sensor de corriente.
2	Regulador de tensión.
3	Driver del puente H HIP4081
4	Mosfets de potencia del puente H.

Para medir la corriente se toma la caída de tensión existente en dos resistencias de bajo valor ubicadas en las dos ramas inferiores del puente H. A continuación, se filtra la medida y se ajusta la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

amplificación de la configuración no inversora pasa bajos mediante un potenciómetro para obtener una señal de tensión medible por el conversor A/D equivalente a la corriente circulante por los devanados del motor.

3 PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE

3.1- SOFTWARE MOTORPIIC

El firmware del microcontrolador se ha programado en C. Se han configurado todos los puertos del mismo y se han establecido 2 temporizadores. Uno principal que provoca interrupción cada 10ms y otro secundario que lo hace cada 200 ms.

En cada interrupción principal el microcontrolador es capaz de:

- Generar una señal de referencia, de acuerdo a la forma de onda especificada desde Autopiic.
- Leer los pulsos del encoder en cuadratura.
- Realizar las conversiones unitarias oportunas entre los datos leídos y su correspondencia física.
- Determinar el modo de trabajo: sistema sin conexión, experimento de modelado, de control de velocidad o de control de posición.
- Cerrar el lazo de control correspondiente para cada modo de trabajo si es necesario.
- Transmitir la información por el puerto serie de los puntos que van a componer las gráficas en el interfaz con las unidades adecuadas.
- Enviar la nueva información del nuevo PWM al driver de potencia.
- Leer y enviar información de la corriente por el motor y los datos del potenciómetro del frontal de la maqueta que puede emplearse también como generador de consignas.

La única función de la interrupción secundaria es verificar el estado de la comunicación para detener el equipo en caso de fallo en la misma.

Al mismo tiempo Motorpiic es capaz de atender y responder a interrupciones externas debidas a las tramas de comunicación desde Autopiic. En concreto, se han programado 23 cabeceras distintas con funciones diversas: Periodo, amplitud y consigna del generador de señal, ganancias de los distintos parámetros de los controladores, envío de los datos gráficos y espaciado de los mismos…

3.2- SOFTWARE AUTOPIIC

El interfaz gráfico Autopiic relaciona el estudiante con Motorpiic. Para evitar errores que pudieran llevar a una incorrecta realización de la práctica se ha buscado la mayor sencillez posible, Figura 7.

En la programación del interfaz se han tenido principalmente tres cosas en cuenta: Una conexión robusta y fácil de configurar entre Autopiic y Motorpiic. Fluidez en el intercambio de datos sin retrasos. E inclusión de dos gráficas por práctica que no precisasen de gran tiempo de computación para añadir datos en tiempo real.

Para facilitar la conexión, Autopiic detecta el puerto serie, real o virtual, al que se ha conectado Motorpiic. El sondeo consiste en mandar el nombre del puerto disponible en ASCII a través del mismo. Motorpiic, si está desconectado, reenvia el nombre recibido. De este modo, si Autopiic recibe el mismo nombre que ha recibido sabe a qué puerto está conectado el equipo de prácticas. Estableciendo, a continuación, la conexión sin ninguna intervención del usuario.

Se sabe que el espaciado por defectos entre los datos enviados por Motorpiic para graficar es de 30 ms, pudiendo reducirse hasta 10 ms y ampliarse hasta 100 ms en las opciones gráficas de Autopiic en función de la potencia del ordenador. Cada nuevo dato supone tres puntos nuevos en las gráficas. Al mismo tiempo, también se reciben las tramas que mantienen la conexión activa e informan de la corriente del motor. Y se permite el envío de tramas hacia Motorpiic.

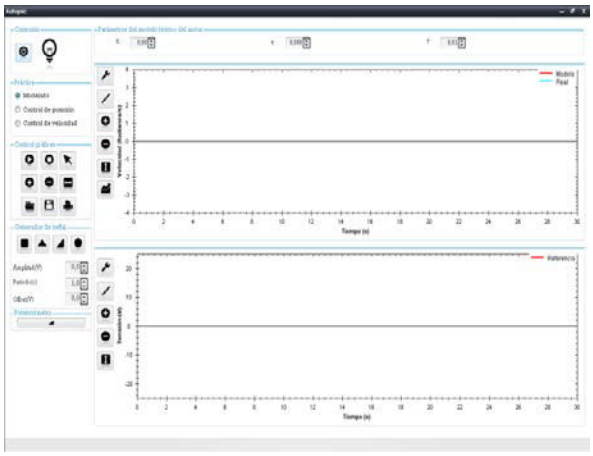


Figura (7): Ventana principal de Autopiic

De este modo, se han programado en VB.NET dos tareas en multiprocesamiento. La primera, es la responsable de las comunicaciones con el puerto serie. Mientras la segunda analiza las tramas y ubica los puntos de las gráficas correspondientes en segundo plano para evitar que el interfaz quede congelado.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para dibujar las gráficas se ha empleado la librería de código abierto Zedgraph [5]. Zedgraph ha permitido crear una aplicación con gráficas flexibles que permiten ser escaladas en ambos ejes en tiempo de ejecución, superpuestas, detenidas, reiniciadas, impresas e incluso guardadas en distintos formatos empleando menos recursos que las librerías incluidas por defecto en VB.NET

4 TRABAJAR CON AUTOPIIC

Autopiic ofrece diversas configuraciones y para facilitar las prácticas. Antes de ejecutarlo, debe conectarse el cable de puerto serie o conversor al ordenador. A continuación se muestra la ventana de presentación, Figura 8. Y la ventana principal, Figura 7, si la conexión entre Motorpiic y Autopiic ha sido correcta.

Figura (8): Ventana de presentación

En caso de que la conexión no esté disponible, o haya un error, se muestra la imagen de la Figura 9 que resetea la aplicación en diez segundos si el problema no se soluciona.

Figura (9): Fallo en la comunicación

La ventana principal está divida en varios apartados: conexión, elección de experimento, opciones gráficas generales y control de eje X de ambas gráficas, generador de señal, información de corriente, configuración de los controladores y ambas gráficas con su control de ejes Y correspondiente y su configuración que ocupan la mayoría del espacio visible.

Se elige el experimento a realizar: modelado, control de posición o control de velocidad, y se pulsa el botón de conectar, Figura 10. La ventana principal se adapta a cada uno de ellos ocultando los elementos innecesarios. Por ejemplo, al conectar, se mostrará al lado de la bombilla un acceso al PDF de la práctica donde se encuentra el guión de la misma.

La elección de las referencias/consignas se realiza mediante el generador de señal, Figura 11. Es capaz de dar referencias cuadradas, triangulares, en forma de diente de sierra o senoidales. Los cambios de valor en amplitud, periodo o desplazamiento en el eje vertical, offset, pueden darse en cualquier momento, pero no se aplican hasta no completar la onda en curso. También es posible modificar la consigna mediante el potenciómetro real ubicado en el frontal de Motorpiic anulando el generador de señal pulsando en el interruptor correspondiente.

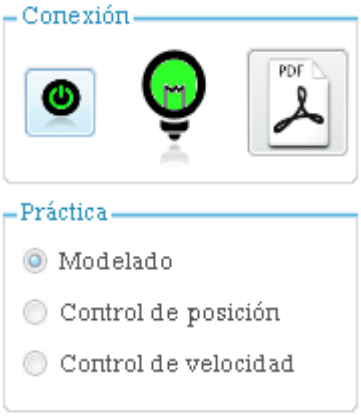


Figura (10): Selección de experimento

La representación gráfica es flexible y hay opciones para desplazar, ampliar, reducir o ajustar ambos ejes de las dos gráficas. Así como, guardar, abrir ficheros de imagen .soap o imprimir ambas representaciones para un posterior análisis.

Figura (11): Generador de señal

También se pueden superponer las gráficas para facilitar el estudio del tiempo de respuesta. Otras opciones son: selección a voluntad de los colores de las gráficas y ajuste de rendimiento a equipos poco potentes. Para ello, se permite ampliar el espaciado entre puntos y aumentar los puntos recibidos antes de actualizar la representación.

Cada experimento cuenta con sus parámetros

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ajustables en la zona superior de la ventana principal mostrándose unos u otros en función del experimento seleccionado.

5 LOS EXPERIMENTOS

Se cuenta con un motor con reductora, cuya representación esquemática puede verse en la Figura 12, para realizar los experimentos de modelado, control de posición y control de velocidad. A través de ellos el estudiante va a ser capaz de afianzar los conocimientos vistos en clase observando la correlación de la teoría con el mundo real en sistemas de bajo orden.

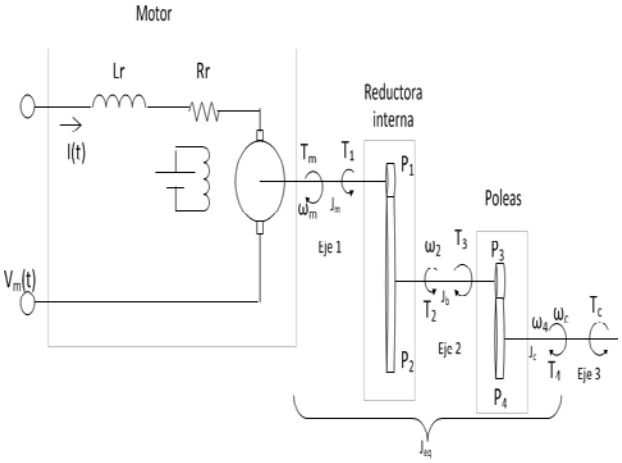


Figura (12): Esquema mecano-eléctrico de Motorpiic

Los experimentos están divididos en 2 etapas:

- La etapa pre-laboratorio que debe ser realizada en casa o en clase conjuntamente con el profesor,
- y la etapa de laboratorio en la que se trabaja con el equipo, y se comprueba la relación entre los resultados obtenidos en teoría con la realidad.

Los guiones de prácticas están preparados para ser completados por el alumno en el correspondiente apartado de cada ejercicio y pueden ser consultados desde el propio interfaz.

El experimento de modelado muestra la importancia de conocer el sistema antes de pasar a su control. En primer lugar el estudiante obtiene el modelo teórico del sistema en lazo abierto. Para a continuación, realizar pruebas mediante el interfaz con objeto de determinar la función de transferencia del mismo.

Por último, comprueba mediante una simulación de un sistema de primer orden implementado en Motorpiic en paralelo la validez del modelo hallado, Figura 13.

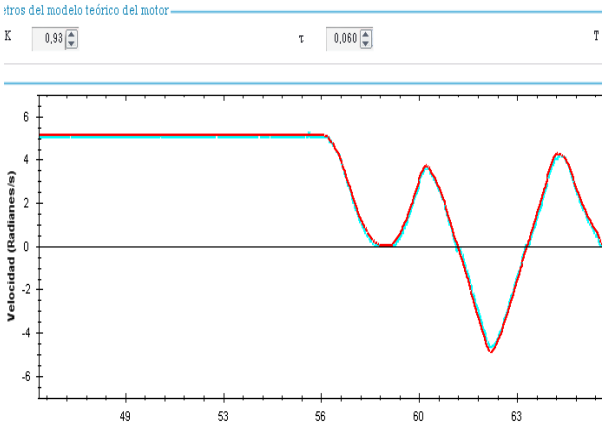


Figura (13): Lazo abierto: Rojo-Velocidad del modelo teórico hallado; Azul-Velocidad real del motor.

El experimento control de velocidad, Figura 14, aplica control Proporcional Integral, uno de los esquemas de control más empleados en la industria y con el que conviene familiarizarse. El estudiante investiga sobre el controlador y calcula las ganancias adecuadas del PI para el sistema. Mediante Motorpiic, es capaz de sintonizar el controlador de Motorpiic y verificar la coherencia.

Además, en el experimento se estudia el efecto del windup integral , Figura 15, y se discute acerca del seguimiento del sistema a distintas entradas: cuadrada, triangular, diente de sierra, senoidal.

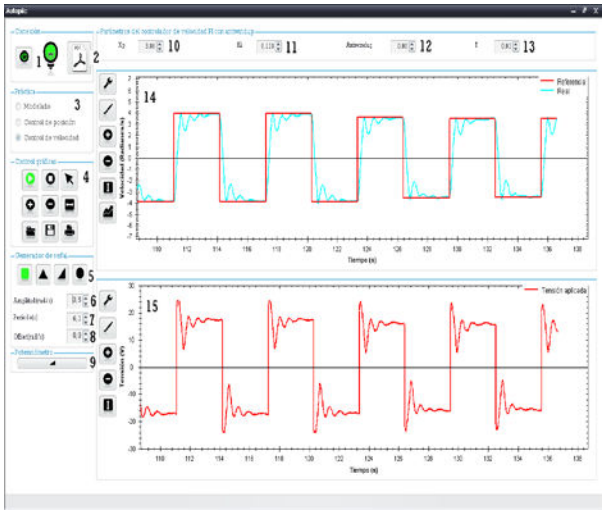


Figura (14): Control de Velocidad mediante estrategia PI: Arriba: rojo consigna, azul velocidad real. Abajo rojo señal de control.

Para completar la formación, se estudia el control de posición de PID. El estudiante analiza e investiga el controlador de nuevo para proponer unas ganancias adecuadas para el equipo. A continuación se pasa a contrastar la teoría con el equipo físico.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

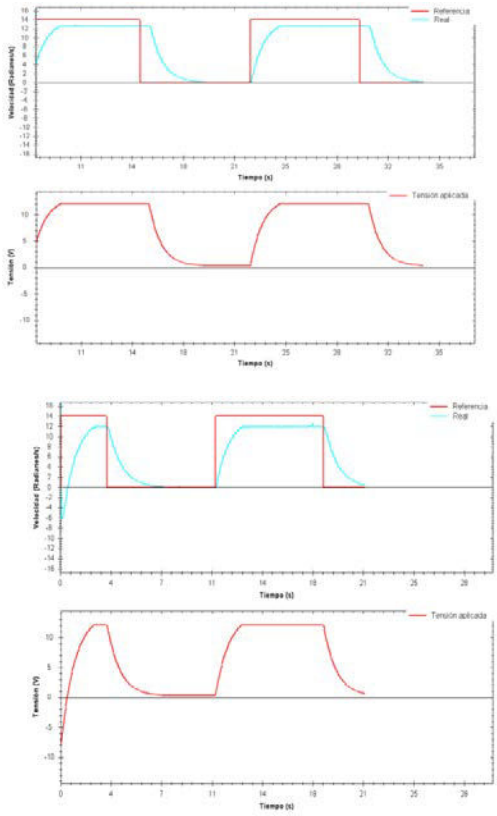


Figura (15): Saturación del Término integral y su eliminación

6 RESULTADOS ACADEMICOS

El sistema ha sido utilizado en los cursos académicos 12_13 y 13_14. En la actualidad la maqueta está en su versión número 3 (cambiado: motor prototipo inicial, reductora, encoder, soporte volante de inercia; y añadida ventilación forzada para los motores y evitar problemas con los aislantes del rotor) y el software en su versión v6.3 (valores numéricos limitados para evitar malfuncionamiento del equipo y stress mecánico al motor; perturbación externa ejecutada de forma electrónica para evitar problemas a los estudiantes y los equipos).

Cada curso académico deben realizar prácticas de laboratorio de Fundamentos de Automática con estos equipos, un total de 400 estudiantes distribuidos en grupos de veinte estudiantes (20 estudiantes es la capacidad del laboratorio de alumnos ISA en la EII UVa) y grupos de dos estudiantes (los alumnos han mostrado preferencia por trabajar en grupos de dos en lugar de hacerlo de forma individual como se tenía previsto inicialmente), esto supone organizar sesiones de laboratorio para veinte grupos de veinte estudiantes grupo.

Las sesiones de laboratorio se realizan en aulas informáticas de veinte PCs (en los turnos de mañana, 12, hay sesiones paralelas 20+20) habilitadas para diez puestos, donde se colocan diez equipos antes de la realización de las prácticas y se retiran al final. Las sesiones de laboratorio son de dos horas con lo que cada estudiante realiza un total de seis horas con los equipos (tres sesiones por dos horas sesión: modelado, control de velocidad, control de posición).

En total son necesarias ciento veinte horas de laboratorio (veinte grupos por dos horas sesión por tres sesiones de laboratorio), repartidas en tres semanas de las quince con que cuenta el cuatrimestre (una por práctica) del cuatrimestre de forma coordinada con la teoría. Esto se hace así para no generar huecos en los horarios de los estudiantes. Las sesiones de prácticas se alojan en las horas extremas de los horarios por la mañana y por la tarde.

Adicionalmente a los estudiantes que necesitan revisar/rehacer/rematar cálculos o sencillamente afianzar conocimientos se les facilita acceso libre a los equipos fuera del horario programado, siendo organizadas estas sesiones extraordinarias vía la herramienta “consulta” de moodle, de tal suerte que los propios estudiantes deciden el horario que mejor se ajustaba a su planificación, en función de las horas habilitadas (tanto en jornada de mañana como de tarde). Esto como es lógico supone una mayor carga para el profesorado, la cual no es tenida en cuenta ni es agradecida por nadie.

A pesar de ello los resultados son completamente satisfactorios tanto para los estudiantes como para el resto del personal implicado (profesorado, PAS de laboratorio).

7 COSTE

El precio unitario por equipo, que resulta reflejado en la tabla 3, no incluye el coste de diseño de las etapas de potencia y control, el cual ha sido cedido por la Fundación CARTIF (www.cartif.es); ni el correspondiente al desarrollo software de Motorpiic y Autopiic por tratarse de un PFC; ni la elaboración de los guiones de prácticas de los cuales ya existen dos versiones, la del curso 11_12 y la del 12_13. Éstos son modificados en cada curso para evitar que las soluciones de un curso para otro empañen la utilidad del equipo y los estudiantes trabajen menos de lo esperado.

Tabla 3

Resumen de costes asociados	
Descripción	**Coste (€)**
Etapa de potencia (tarjeta y componentes)	38,20
Etapa de control (tarjeta y componentes).	27,50
Motor, reductora, encoder, polea,	298,00

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

correa, volante de inercia, placa base, conversor USB y cableado. fuente	
Material fungible para ensamblaje	20,25
Coste de las horas de montaje	203,50
Total	**587,45**

Se ha conseguido un coste por equipo inferior a otras opciones comerciales disponibles en el mercado, lo que ha permitido contar con un número elevado de maquetas para atender a las necesidades que un número alto de estudiantes plantea.

7 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.

Se ha diseñado, fabricado y puesto operativos un conjunto de 24 equipos de prácticas (10+2, 10+2) que permiten aprender y afianzar los conceptos básicos de la Teoría de Control como son el Modelado y los Reguladores PI y PID. Es la versión número 3 del equipo.

Los problemas encontrados en las anteriores versiones han sido: En cuanto a la versión 1:

- Los sensores que generaban el tren de impulsos solo entregaban un pulso por vuelta.
- Se descartan la totalidad de motores comprados ya que era imposible encontrar repuestos.
- El cambio de motores supone pasar de motores de 24Vcc a 12Vcc, disponer de 8 impulsos por vuelta del motor y reductora 1/50 en lugar de 1/32 como los originales.
- El sensor de corriente no resulta fiable ni repetitivo, debe ser ajustado equipo a equipo.

En la versión 2:

- El puente H se calienta en exceso, varios de ellos se queman. Se cambia la disposición de las tarjetas para favorecer la disipación de calor.
- Los motores se calientan y en varios de ellos el plástico del soporte del bobinado del rotor se funde. Los trozos desprendidos bloquean el rotor al quedar alojados entre el rotor y el estator.
- Los potenciómetros que sirven de eje para el volante de inercia, se gripan y llegan a bloquear el conjunto y eso que la reductora total es de 1/100, debido al ensayo de medición de la resistencia del rotor.

Se cambia el software para evitar frecuencias de trabajo altas y se limita el periodo del generador de funciones de la aplicación para que las ondas tengan como mínimo 10s de periodo. Además de colocan ventiladores para eliminar calor mediante convección forzada en lugar de natural. La temperatura se reduce un 50% de 70 a 35.

Las prácticas propuestas se ajustan a la asignatura Fundamentos de Automática (2ºcurso, 2ºcuatrimetre) de los grados de Ingeniería Industrial de la EII UVa (Mecánico, Eléctrico, Electrónico, Químico y Organización de 4.5 ECTS: 1.5 Teoría, 1.4 Problemas y 1.6 Laboratorio) [6].

Se ha construido un sistema sencillo, motor de corriente continua, controlado a través de un microcontrolador dsPIC programado en C comunicado en tiempo real con un interfaz desarrollado en Visual Basic .NET [7] que permite ajustar el sistema y obtener datos suficientes del mismo para extraer conclusiones.

El sistema aunque ajustado a la asignatura citada queda abierto a otras asignaturas de cursos superiores, bastando simplemente con reprogramar el microcontrolador y generar una nueva aplicación HMI de usuario.

En cuanto a las líneas futuras de trabajo, que ya están fijadas, y en algunos casos se están realizando para el curso 14_15 son:

1) Cambiar el puente H por uno comercial, que incluye sensor de corriente.
2) Eliminar el adaptador RS232 USB.
3) Cambiar la placa del microcontrolador por una basada en Arduino.
4) Cambiar el potenciómetro usado como apoyo por sistema eje y rodamiento.
5) Cambiar el volante de inercia de aluminio por otro con más inercia, por ejemplo de fundición pe.

Referencias

[1] K. Ogata, (2010) Ingeniería de control moderna. Pearson Prentice-Hall, (5ª ed.).

[2] J.M Angulo, (2010) Diseño práctico de aplicaciones dsPIC. McGraw Hill.

[3] K. J. Aström, USB QUICii Laboratory Workbook. Quanser

[4] Microchip., <http://www.microchip.com>, (último acceso 04-01-2013)

[5] Zedgraph., < http://zedgraph.dariowiz.com>, (último acceso 02-01-2013)

[6] http://www.uva.es/consultas/planesestudios/guia?menu=1&codigo_plan=455&codigo_asignatura=42607&ano_academico=1314&grupo=1 (último acceso 02-01-2013)

[7] L. Blanco, (2002) Programación en Visual Basic .NET. Grupo Eidos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DISEÑO DE UN REGULADOR FUZZY PARA PLANTA DE LABORATORIO

José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle
Dpto. de Enxeñería Industrial, Escuela Universitaria Politécnica de Ferrol,
Universidade da Coruña
jose.luis.casteleiro@udc.es, jlcalvo@udc.es

Matilde Santos
Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid
msantos@ucm.es

Resumen

En este trabajo se expone el diseño de un regulador Fuzzy para el control de temperatura en un horno didáctico de laboratorio. Este sistema es uno de los ejemplos tipo de plantas con tiempo de reacción lento debido, principalmente, a la inercia térmica de la misma. Además las variaciones de la temperatura son no lineales, por lo que el uso de control inteligente puede ayudar a controlarlas. De hecho el diseño del controlador borroso se ha hecho basándose exclusivamente en el conocimiento heurístico del comportamiento de la planta y de los rangos de las variables. En este sentido la finalidad didáctica de esta experiencia se ve potenciada ya que no se requiere un conocimiento matemático de las ecuaciones dinámicas del horno y permite centrarse en el control y en la implementación del mismo en una planta real. El controlador borroso que se ha implementado es un PD incremental. Los resultados alcanzados en la planta real son satisfactorios.

Palabras Clave: Control inteligente, Controlador Fuzzy, Planta de laboratorio, Horno, Temperatura.

1 INTRODUCCIÓN

Las plantas de laboratorio son ampliamente usadas en las enseñanzas universitarias para que los alumnos puedan comprobar el uso práctico de los conocimientos adquiridos en las clases teóricas [3]. Actualmente hay varias iniciativas que incluso permiten realizar control remoto de plantas reales de laboratorio (laboratorios remotos) que se encuentran en universidades físicamente lejanas de los alumnos que realizan las prácticas con ellas [4,10]. Con este objetivo, en este trabajo se presentará el desarrollo de un regulador Fuzzy para una de las plantas de laboratorio diseñada y construida por la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidade da Coruña. Concretamente, se desarrollará el trabajo sobre un horno didáctico, en el que se pretende controlar la temperatura [9]. En un futuro, se estudiará la implantación de un laboratorio remoto en esta escuela. En el desarrollo de este trabajo se ha tenido en cuenta este hecho a la hora de diseñar el regulador y la aplicación de control propuesta.

El uso de los reguladores Fuzzy en ambientes industriales se ha ido incrementando paulatinamente desde 1975, cuando Mandini presentó el primer regulador basado en lógica Fuzzy [7]. Sin embargo, dado que para su implantación es necesario reconfigurar el sistema de control, actualmente aún sigue siendo el control mediante reguladores tipo PID el más extendido en las plantas industriales [1]. Este hecho no se debe a que los controladores tradicionales funcionen mejor, sino porque, por normal general, los empresarios se sienten reacios a introducir cambios en los sistemas de control cuando éstos funcionan correctamente, aunque no sea de manera óptima [1].

Los reguladores borrosos están basados en la aplicación de la lógica Fuzzy en control [8]. En el estudio de un regulador de este tipo se pueden encontrar diversas partes bien diferenciadas. Estas partes se pueden enumerar, desde la entrada a la salida, según: el pre-procesado, la "fuzzyficación", el motor de inferencia, la base de reglas, la "de-fuzzyficación", y el post-procesado [5,6]. A lo largo de este trabajo se mencionará el uso que se hace de cada una de estas partes del regulador, así como la configuración e implementación concreta para el caso práctico que nos ocupa.

Este trabajo se puede estructurar de la siguiente manera; después de esta breve introducción, se expondrá el caso práctico donde se describe la parte hardware de los experimentos llevados a cabo. En la sección de materiales y métodos, se expondrá el funcionamiento interno del regulador Fuzzy, así como la implementación en el programa MatLAB® para las pruebas. Posteriormente, se expondrán los resultados obtenidos; y se finalizará presentando las conclusiones de las pruebas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 CASO DE ESTUDIO

En este apartado se describirá la planta de laboratorio usada para los experimentos, así como la tarjeta de adquisición de datos para la comunicación entre el PC de control a la planta de laboratorio propiamente dicha.

2.1 PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE TEMPERATURA

La planta de laboratorio de control de temperatura (figura 1) está considerada como un proceso con tiempo de respuesta lento. Cabe destacar que debido al diseño y la naturaleza de la propia planta, se trata de un proceso no lineal, y no se dispone del modelo. Además, debido a la inercia térmica, no es posible la realización de pruebas consecutivas, precisando un tiempo de enfriamiento después de cada una.

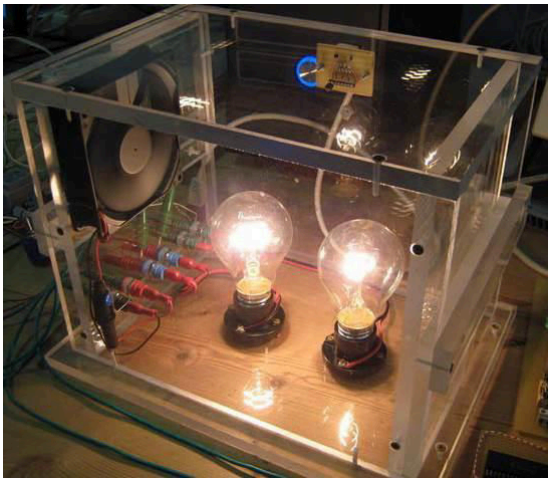


Figura 1: Planta de laboratorio de control de temperatura

En este caso, la planta de laboratorio emula el comportamiento de un horno y, a pesar de no tener un diseño eficiente, se ha construido pensando en el enfoque claramente didáctico de la misma. Así, se ha incluido como elemento calefactor unas bombillas incandescentes, y paredes de metacrilato para poder apreciar la variación de la luminosidad, y consecuentemente de la potencia aplicada, según la señal de control aplicada en cada momento.

Al tratarse de bombillas alimentadas con corriente alterna, esta planta de laboratorio dispone de un acondicionador para la señal de control que, a través de un sistema basado en microcontrolador, regula el disparo de un triac para controlar la señal aplicada a las bombillas en función de la potencia solicitada por la señal de entrada (figura 2). La gran ventaja de usar este acondicionador, es que para una señal de control entre 0 y 10 voltios, se consigue una entrega lineal de potencia entre el 0 y el 100% al elemento calefactor.

Además de acondicionar la señal de control, este módulo dispone de un circuito para adaptar la salida de la planta. La temperatura en el interior del horno es medida a través de un sensor LM35 cuya salida varía entre 0 y 1 voltio para temperaturas de 0 a 100ºC. Debido a que la tarjeta de adquisición de datos, así como el resto de variables del proceso, utiliza un rango de 0 a 10 voltios, se ha incluido un amplificador en el interior del acondicionador de la figura 2 para que la señal de temperatura de salida de la planta se encuentre en el rango de 0 a 10 voltios para temperaturas de 0 a 100ºC. Con esto se consigue unificar los rangos de funcionamiento de todas las variables de la planta.

Figura 2: Acondicionador para el horno didáctico

2.1.1 Variables del proceso

Como se ha mencionado, las variables que intervienen en el proceso trabajan dentro del mismo rango gracias al módulo acondicionador. Cabe destacar, que a pesar de que el sistema dispone de dos elementos calefactores, dos bombillas, éstas no están interconectadas entre sí internamente, sino que es posible el uso de una o de las dos (conectándolas externamente) para el control de la temperatura, figura 3. De esta manera, se podría usar una de ellas para control, y la otra como una posible perturbación en el sistema.

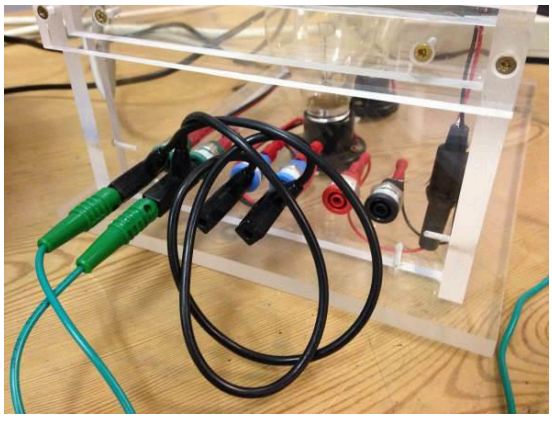


Figura 3: Panel de conexiones del horno didáctico

2.1.2 Perturbaciones del sistema

El horno dispone de dos puertas laterales para perturbar el sistema simplemente con su apertura. Además, se ha instalado un ventilador que permite la emulación de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

fugas de calor en el sistema para incrementar el efecto de la apertura de las puertas.

Como se ha mencionado, también existe la posibilidad del uso de una de las bombillas como perturbación, lo que hace al sistema mucho más versátil. Las perturbaciones pueden emularse para desplazar el punto de operación en los dos sentidos, tanto para aumentar la temperatura (bombilla), como para disminuirla (ventilador).

2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

La tarjeta de adquisición de datos utilizada para los experimentos ha sido una tarjeta del fabricante National Instruments con conexión al PC a través del bus USB. Concretamente la tarjeta NI-USB 6008 (figura 4).

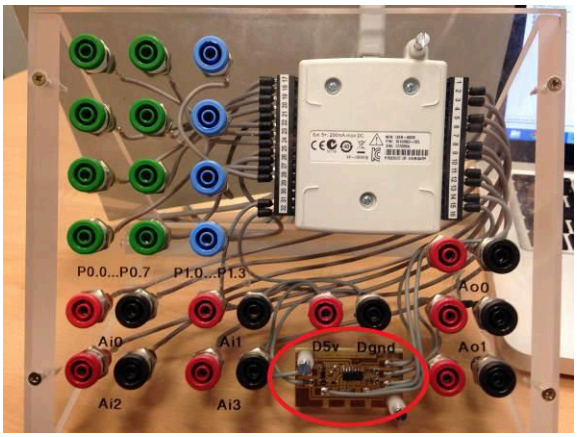


Figura 4: Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008

Esta tarjeta dispone de 4 entradas analógicas diferenciales con un rango máximo de trabajo de 0 a 10 voltios. En los experimentos sólo se usará una de éstas entradas, ya que la planta de laboratorio sólo dispone de una salida a monitorizar.

En lo que a salidas analógicas se refiere, la tarjeta dispone de dos salidas con un rango de 0 a 5 voltios. A pesar de ser un rango diferente de las variables de la planta de laboratorio, en el propio módulo donde se ha instalado la tarjeta se ha añadido con un amplificador de ganancia 2, para que las señales de salida de la tarjeta estén en el rango correcto para el control de las diferentes plantas de laboratorio. Este amplificador se puede apreciar en la figura 4, en la parte inferior del panel de conexiones.

Los experimentos llevados a cabo con el horno didáctico sólo utilizan una señal de control, que indicará la potencia a entregar por la bombilla, con lo que sólo será necesaria la conexión de uno de los canales de salida.

Además de las indicadas, la tarjeta de adquisición de datos dispone de 12 entradas/salidas digitales, que no se utilizan en los experimentos llevados a cabo en este trabajo.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal de este trabajo, como se ha mencionado, es el desarrollo de un regulador Fuzzy para el control de una planta de laboratorio. En este apartado se expondrán brevemente los bloques funcionales internos de un regulador de este tipo, así como la configuración concreta para este trabajo.

Para entender mejor las explicaciones sucesivas y la configuración del sistema de control, se presentan los diagramas de bloques que definirán el control implementado. Así, en la figura 5 se muestra el diagrama de control general, con las señales de la planta a controlar indicadas; mientras que la figura 6 muestra el diagrama básico de un regulador Fuzzy.

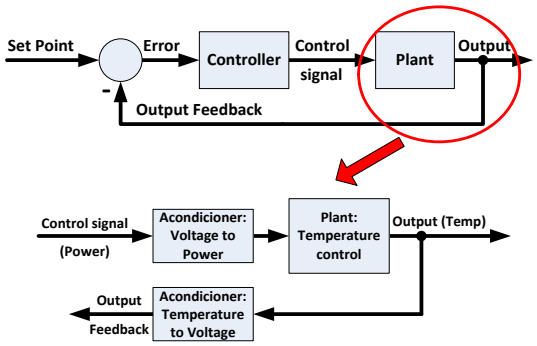


Figura 5: Diagrama de control y de la planta de laboratorio

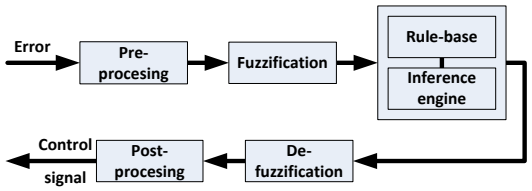


Figura 6: Diagrama del regulador Fuzzy

La señal de control mostrada en la figura 6, no es la aplicada directamente a la planta. La señal de control estará compuesta por la salida del regulador Fuzzy, sumada con la señal de control aplicada en el instante anterior. Es decir, se trata de un controlador incremental (figura 7).

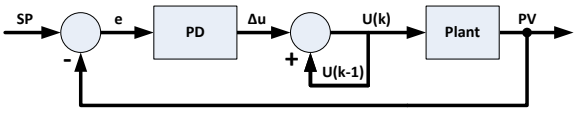


Figura 7: Regulador PD incremental

En objetivo principal de este trabajo es mostrar una implementación inicial de un regulador Fuzzy en un sistema real.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL REGULADOR

El regulador Fuzzy implementado en este trabajo se ha generado con la "Fuzzy Logic Toolbox" del programa MatLAB®. Esta toolbox facilita la implementación del regulador, al disponer de un interface gráfico concreto para el diseño de estos reguladores.

En este caso,se ha diseñado con dos señales de entrada y una de salida. Como se explicó, la salida (*DeltaPower*) se corresponde con los cambios en la señal de control que se envía a la planta, y las entradas se corresponden con el error en la variable de proceso (*Error*), y con la tendencia de la variable de proceso (*Trend*). Para calcular la segunda señal de entrada, se hace uso del cálculo de la derivada por puntos.

Las funciones de pertenencia utilizadas para este regulador son de tipo trapezoidal, y la gran mayoría de ellas están superpuestas con cierto grado de solapamiento. En la figura 8 se pueden ver las funciones de pertenencia para las dos entradas del regulador.

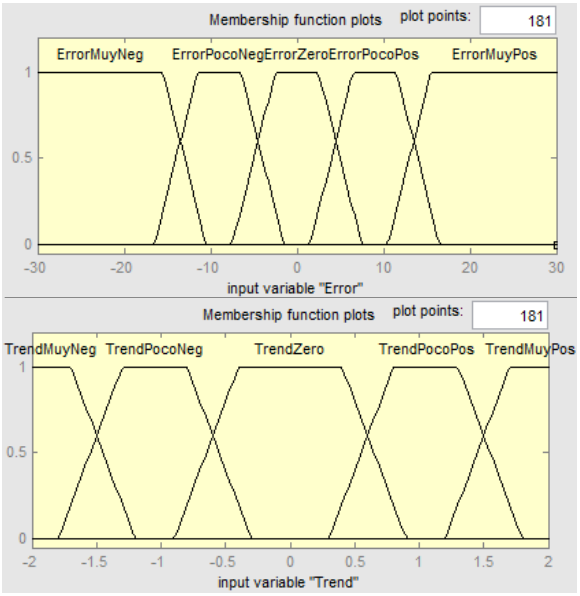


Figura 8: Funciones de pertenencia para las entradas

3.1.1 Fuzzyficación

La "fuzzyficación" consiste en encontrar el grado de pertenencia de cada valor de entrada a cada conjunto borroso. Así, por ejemplo, la señal de error puede ser asignada hasta en 5 funciones de pertenencia diferentes (error muy negativo, poco negativo, sin error, error poco positivo y muy positivo). Además, como se puede apreciar, en la figura 8, hay zonas donde las señales se encuentran dentro de dos funciones de pertenencia diferentes (no linealidad del controlador).

Las funciones de pertenencia para la salida se han elegido de tipo "singleton", y se muestran en la figura 9. En ella, se puede ver que los cambios en la señal de salida se repartieron en 11 valores diferentes.

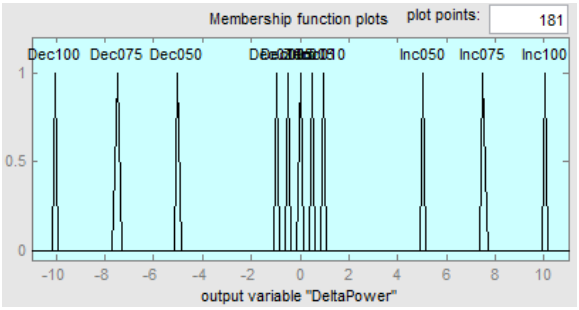


Figura 9: Funciones de pertenencia para la salida

La elección de estos 11 valores se hizo para que el sistema pudiese variar los incrementos en función del estado de sus señales. Así, por ejemplo, cuando la variable de proceso está "lejos" de su valor deseado, los cambios introducidos serán más grandes para poder alcanzar el valor deseado con mayor rapidez.

3.1.2 Base de reglas

Se han descrito 25 reglas que interrelacionan la salida en cada instante con las señales de entrada. Algunas de estas reglas se muestran a continuación:

- Si el *Error* es *Muy positivo*, y la *Derivada* es *Muy negativa*, $\Delta u = 10$
- Si el *Error* es *Poco positivo*, y la *Derivada* es *Poco negativa*, $\Delta u = 7.5$
- Si el *Error* es *Poco positivo*, y la *Derivada* es *Muy Positiva*, $\Delta u = -1$
- Si el *Error* es *Poco negativo*, y la *Derivada* es *Poco positiva*, $\Delta u = -7.5$
- Si el *Error* es *Muy negativo*, y la *Derivada* es *Poco negativa*, $\Delta u = -5$

3.1.3 Motor de inferencia - Defuzzyficación

El motor de inferencia del regulador es básicamente la obtención de una salida, en función de base de reglas. El método de inferencia del regulador es el *max-min*.

Por último, la "de-fuzzyficación" de la salida consiste en el cálculo de un valor preciso de la salida que en este caso viene dado de forma directa por el valor de la salida ("singleton").

3.2 PRUEBAS REALIZADAS

Para la realización de las pruebas se han programado tres *scripts* diferentes, junto con sus funciones. La elección de esta metodología de programación se ha hecho para separar la función de los programas según:

- Comunicación con la planta; interface real con la tarjeta de adquisición de datos.
- Cálculo de la señal de control en función de las medidas realizadas.
- Presentación de los datos en pantalla.

En la figura 10 se muestra de manera esquemática el funcionamiento de los tres programas; en esta figura se presenta como un ordenador independiente cada uno de los programas. Esta forma de programación posibilita la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

elección de diferentes frecuencias de funcionamiento tanto para la adquisición/generación, para el control y para la presentación; así como facilita el control remoto de la planta.

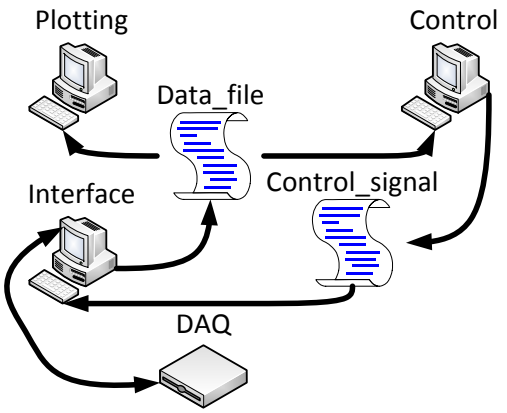


Figura 10: Funcionamiento conjunto de los programas

La comunicación entre los tres programas se hace a través de ficheros de texto. El programa "Interface" escribe en el fichero una fila nueva de datos en cada iteración, a la vez que lee, de otro fichero, la señal de control a aplicar a la planta, que es calculada por el segundo programa. Los datos grabados son el tiempo, la señal de control aplicada a la planta, la variable de proceso filtrada, y la variable de proceso sin filtrar. El programa ya incorpora un filtro software diseñado para evitar el ruido y los fallos de lectura. Se ha implementado un filtro paso bajo de primer orden, con frecuencia de corte de 2 Hz.

El programa de "Control_de_planta", accede a los valores grabados por el programa "Interface", y, según las medidas almacenadas, calcula la señal de control en cada momento. Una vez finalizados los cálculos, la señal de control se escribe en el fichero que leerá el programa "Interface" para generar la señal de entrada a la planta a través del DAQ.

El tercer programa, "Representación_de_datos", accede al mismo fichero que el programa anterior, pero no realiza ningún calculo con ellos, simplemente genera una gráfica para poder ver la evolución de las diferentes señales en el tiempo.

4 RESULTADOS

Las pruebas llevadas a cabo para la comprobación del correcto funcionamiento del regulador, han sido la medición del tiempo de respuesta, y la reacción del sistema a perturbaciones.

En la figura 11 se puede ver la respuesta del sistema con el regulador implementado. La línea azul es la temperatura en el interior del horno, la roja discontinua es la potencia aplicada al sistema, y la negra punteada sería la consigna del sistema. Puede verse como el sistema se estabiliza en aproximadamente 5 minutos y medio. Se ha definido el tiempo de asentamiento como el 5% del valor final de referencia, por lo tanto se ha obtenido un *ts=330* sg.

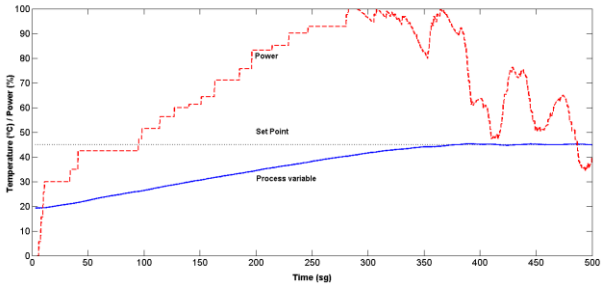


Figura 11: Respuesta del sistema

En la figura 12 se muestra la respuesta del sistema ante una perturbación. Inicialmente, se abrieron las puertas laterales, y se puso el ventilador para bajar la temperatura lo máximo posible; pero el sistema no fue capaz de reaccionar. Esta es una limitación del propio sistema, del horno, con lo que no se tuvo en cuenta. Sin embargo, cuando se cerró una de las puertas laterales, aún con el ventilador funcionando, el regulador fue capaz de corregir la desviación de manera eficaz, estabilizando de nuevo el sistema en aproximadamente un minuto, después de haberse reducido la temperatura en aproximadamente 6 grados.

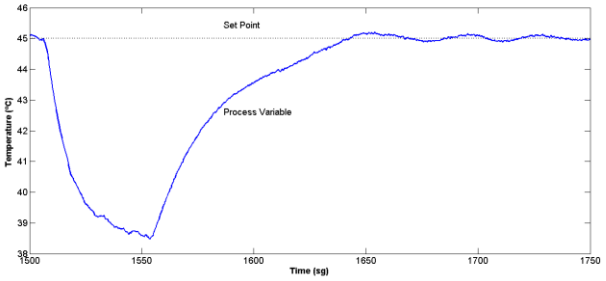


Figura 12: Respuesta a una perturbación

La respuesta del sistema no ha presentado sobreoscilación en ningún momento, y una vez que la señal alcanzó el régimen permanente, no ha salido de la banda de estabilidad (±5%) en ningún momento. Sólo la perturbación generada ha hecho que la temperatura saliera de esos márgenes, recuperando la consigna en un tiempo aceptable.

Para hacer una comparación con los resultados obtenidos con el regulador Fuzzy, se ha usado un trabajo previo realizado sobre la misma planta de laboratorio [2]. En dicho trabajo, se realiza la sintonización de un regulador PID en cadena abierta, para un punto de funcionamiento de 60 ºC. Los mejores resultados se obtuvieron usando las fórmulas de Chien et al. para seguimiento de consigna sin sobreoscilación. Una vez sintonizado el regulador con ese método, se realizó una sintonización fina llegando a obtener un tiempo de establecimiento de 15 minutos, y tiempo de recuperación después de una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

perturbación de aproximadamente 3 minutos. La sobreoscilación del sistema fue despreciable tanto para el tiempo de establecimiento como para la perturbación.

5 CONCLUSIONES

Como conclusión principal de este trabajo, cabe destacar la sencillez de implementación de un regulador Fuzzy basándose en el conocimiento heurístico del comportamiento del sistema a controlar. Además, la implementación de los *scripts* de control se ha hecho de manera que se posibilite el control remoto de la planta.

La respuesta obtenida con el regulador diseñado en este trabajo se ha comparado con un regulador PID, y cabe destacar que a pesar de que la respuesta del regulador PID fue más lenta, la señal aplicada al actuador ha sido más suave y con menos cambios, característica deseable en las señales de control para no hacer sufrir a los actuadores.

Referencias

[1] Aström, K.J., Hägglund, T., (2006) Advanced PID Control. ISA - The Instrumentation, System, and Automation Society, Research Triangle Park, NC, USA.

[2] Casteleiro-Roca, J.L., (2012) Control mediante Simulink de planta de laboratorio, *Trabajo de Fin de Grado*, Universidad de León.

[3] Domínguez, M., Reguera, P., Fuertes, J., (2010). Laboratorio Remoto para la Enseñanza de la Automática en la Universidad de León (España). *RIAII*, **2**(2), 36-45.

[4] Guzmán, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Dormido, S., (2010) Laboratorio Virtual para la Enseñanza de Control Climático de Invernaderos. *RIAII*, **2**(2), 82-92.

[5] IEC, (1996) "Programmable controllers: Part 7 fuzzy control programming", *Technical Report IEC 1131*, International Electrotechnical Commission.

[6] Lee, C.C., (1990) Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, *IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics* **20**(2): 404-435.

[7] Mamdani, E.H., Assilian, S., (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man Machine Studies* **7**, 1-13.

[8] Passino, K.M. and Yurkovich, S. (1998) Fuzzy Control, AddisonWesley Longman, Inc, Menlo Park, CA, USA.

[9] Piñón Pazos, A., Calvo Rolle, J.L., Casteleiro Roca, J. L., Ferreiro García, R., Pérez Castelo, F.J., (2009) Diseño de horno didáctico para laboratorio. *Jornadas de Automática*.

[10] Vargas, H., Sanchez, J., Jara, C., Candelas, F., Reinoso, O., Díez, J., (2010) Docencia en Automática: Aplicación de las TIC a la realización de actividades prácticas a través de Internet a la realización de actividades prácticas a través de Internet. *RIAII*, **7**(1), 35-45.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL DE RELOJ DE TORRE CON ARDUINO

Eduardo J. Moya de la Torre, F. Javier García Ruíz, José Guzmán Garrido González, Alfonso V. Poncela
(ITAP) Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Ing. de Sistemas y Automática, EII, Paseo del Cauce 59, Valladolid, 47011, España, javgar@eii.uva.es, edumoy@eii.uva.es

Resumen

Este artículo presenta como se puede reemplazar un antiguo automatismo que controla un reloj de torre, por un equipo Arduino, dotándole con nuevas funciones, de las que hoy en día posee cualquier reloj. Se ensamblaran todos los módulos y se realizará una programación adecuada del Arduino, para que interactúe con el medio de forma adecuada. Entre otras funciones, deberá de ser capaz de actualizarse con el cambio horario de verano e invierno, ante cortes en el suministro eléctrico, deberá adelantarse el tiempo adecuado, según estime el usuario final tocará las campanas o no, deberá de ser de fácil e intuitivo manejo.

Palabras Clave: Reloj, Arduino, Automatización, Control.

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo se justifica por la necesidad de dar solución a un problema que se ha planteado en muchos municipios del entorno, dicho problema consiste en poner en funcionamiento el reloj de la torre del ayuntamiento, que llevan parados muchos años. Para mostrar un ejemplo de los tiempos que corren, el ayuntamiento de la localidad de Hontalbilla, no puede costearse la reparación del reloj de la torre del ayuntamiento que desde hace más de medio siglo llevaba dando las horas.

Figura (1): Imagen de la torre del ayuntamiento

Tras comentarlo en varias ocasiones los dirigentes de ayuntamiento, se realiza un primer estudio de si sería viable realizar la reparación mediante Arduino [1], alcance de la plataforma [2], posibilidades [3], etc…

Tras ver que la realización sería posible, desde el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática se intenta dar solución al problema ya que que existe otra línea de actuación en la cual D. Ramiro Merino, está restaurando el reloj de la UVa, con la ayuda de alguno de los propios autores de este artículo. Este es un buen ejemplo de la aplicación de la electrónica y la automática para la regulación de procesos, como por ejemplo la precisión de un reloj.

En el presente trabajo y ya que la maquinaria no es la original, y carece de valor, se reemplazará toda ella, por nuestro pequeño sistema Arduino.

Los objetivos que se tratarán de alcanzar con este trabajo serán la reparación del reloj, sustituyendo el antiguo automatismo que le controlaba, y adicionando algunas de las funciones que como básicas podemos considerar en todo reloj, que son las siguientes:

- El reloj deberá de forma automática, de activar o desactivar las señales horarias, mediante campanas, según se le haya programado en el horario diurno o nocturno.
- Deberá de iluminar la sala donde se encuentran las esferas dependiendo la intensidad lumínica del sol, para que se pueda apreciar la hora bien de noche o bien cuando hay poca luz.
- Aunque la parte analógica del reloj no funciona en ausencia de electricidad, cuando se reponga la conexión deberá de ser capaz de ponerse en hora de forma automática, manteniendo la configuración de las señales horarias y de la iluminación de la sala por la noche.
- De manera automática deberá actualizarse a los cambios horarios de verano y de invierno.
- La interface con el posible usuario deberá ser sencilla y de fácil manejo, dejando atrás los gordos manuales para la puesta en hora del antiguo automatismo.
- Se le incorporará un pulsador externo con el que se pueda activar las campanas, pues de manera tradicional se podría usar para avisar de fuego u otros peligros.
- Como extra se le programará, de forma que el día 1 de enero a las 00:00 horas, se activarán las señales horarias pues forma parte de la tradición del pueblo ir a comer las uvas a la plaza.

El artículo está organizado de la manera siguiente. Aquí se hace una introducción sobre la necesidad del trabajo a desarrollar. En la segunda sección se hace una breve descripción del reloj objeto del trabajo. En

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la tercera sección se presenta la solución Arduino al problema presentado. En la cuarta sección se presenta el diagrama de proceso de la aplicación. En la quinta sección se presentan todos los módulos necesarios para el correcto funcionamiento de la aplicación. En la sexta sección se presenta la realización física del equipo. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas y las líneas de trabajo planteadas en un futuro inmediato, así como las referencias bibliográficas utilizadas.

2 DESCRIPCIÓN DEL RELOJ

Situando los antecedentes históricos del reloj objeto del trabajo podemos decir que a mediados del siglo XIX el ayuntamiento no poseía torre y tras la petición de la gente del pueblo se decidió poner una torre con tres relojes, uno por cada fachada, el primer reloj que se puso era un reloj de cuerda, al que diariamente había que dar cuerda, que consistía en enrollar una pesa de unos 60kg mediante un largo cable de acero a un eje, la pesa iba cayendo por el hueco de la torre y era la que producía el movimiento.

De este reloj no se poseen fotos pero se sabe que era muy parecido al segundo reloj que se puso (Figura 2), a primeros del siglo XX, y que ha durado hasta hoy en día tras una pequeña restauración. La decisión de sustituirle por uno más moderno se tomó sobre los años 90, pues se pretendía que no hubiese que subir todos los días a ponerle en hora y a darle cuerda. Se optó por un reloj digital, que controlaba una pequeña caja de engranajes (figura 11), de la marca francesa Horloges Huchez, cuyo presupuesto según recuerda el secretario podía rondar las 500000 ptas. Era un automatismo, que no estaba muy conseguido pues cada vez que se iba de hora, había que ponerle en hora desde el año 1800, pulso a pulso, minuto a minuto….

Era una tarea que lograba desquiciar al alguacil. Tras unos años de funcionamiento ininterrumpido, empezó a dar problemas de forma casi diaria, con lo que se optó por tenerle parado. Unos años después tras la petición de la gente del pueblo se pidió presupuesto para tratar de repararle, alcanzando dicha cifra inicial unos 1800 euros, que ya era una cifra bastante considerable por lo que se ha mantenido parado hasta la actualidad.

Tras estudiar las posibles soluciones, y viendo que la plataforma Arduino presenta muchas posibilidades, se opta por esta solución económica y que cumple con los requisitos que nos hemos planteado. La idea es programar Arduino interactuando con los actuadores e forma que sea capaz de llevar a cabo dicha tarea, visualmente y cumpla el resto de objetivos, siendo inmune a los cortes eléctricos y comportándose de una manera estable con el paso del tiempo, por lo que querremos que sea lo más exacto posible, durante el mayor tiempo posible.

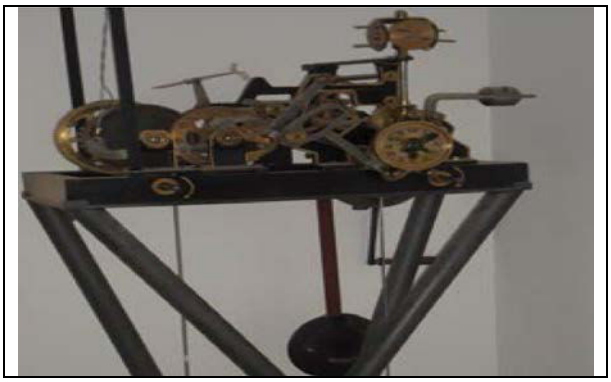


Figura (2): Antiguo reloj, principio siglo XX.

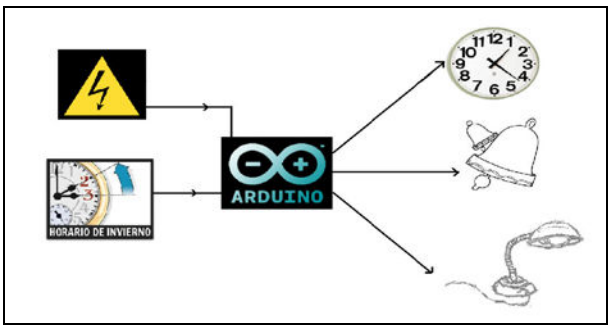


Figura (3): Relación Arduino con el medio.

3 SOLUCIÓN ARDUINO

Arduino [4] es una plataforma abierta dedicada a la electrónica para la creación de todo tipo de proyectos de índole electrónica, basada en software y hardware sencillos cuyo coste de adquisición está al alcance de muchos de nosotros.

Consiste en una pequeña placa electrónica que programada adecuadamente es capaz de interactuar con el medio, a través de los diferentes periféricos electrónicos, es capaz de recibir información del exterior y contrastarla si ese fuera su objetivo, con unos valores patrón para actuar de manera acertada sobre actuadores externos. A través de su amplia gama podemos cubrir nuestras necesidades desde pequeñas aplicaciones de "andar por casa" a importantes automatismos que controlan complejos procesos industriales.

Para el trabajo desarrollado se ha elegido el ATmega 2560 [5], el cual cumple satisfactoriamente los requisitos en cuanto a entradas, salidas, velocidad de procesamiento necesario en nuestro trabajo:

Salidas Arduino:

- Una salida para activar el motor del reloj en una dirección, y otra salida para hacer el cambio de giro del motor, ya que el reloj será provisto de las dos direcciones.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Salida destinada a activar las señales horarias.
- Para activar la luz necesitaremos otra salida.
- Otras 4 salidas, en este caso impuestas por el funcionamiento del display 5,6,7,8 Display 16X2, (Display con comunicación I2C, solo necesitaría 2 salidas).

Entradas Arduino:

- 3 entradas en la botonera para poner fecha y hora el reloj, así como para moverse por el menú desde el que se podrá seleccionar si queremos que suenen las campanas, o que se encienda la luz en el horario nocturno.
- Entrada encargada de detectar el giro de las agujas del reloj analógico, correspondiente a un ángulo equivalente a un minuto, que será el movimiento mínimo que el reloj tendrá.
- Para que el Arduino use la variable tiempo "fecha y hora" necesitaremos un módulo RTC "real time clock" para el cual necesitaremos 2 entradas una de tipo I2C.
- Entrada para poner una sonda LDR, encargada de detectar la oscuridad y hacer que se encienda la luz de las esferas.

Una de las ventajas que posee Arduino es que puede ser programado con el software gratuito el cual podemos encontrar en su web. Además el lenguaje de programación es C, que es un lenguaje muy conocido y muy versátil. La estructura básica que debemos seguir para programar el Arduino es muy simple y se compone como mínimo de 2 partes bien diferenciadas.

```
Void setup ()          Void loop ()
{                      {
Instrucciones;         Instrucciones;
}                      }
```

La parte del programa contenida en setup(), es la encargada de almacenar la información de configuración de toda la parte del hardware, es decir le informa al Arduino de los periféricos que tiene conectados, contiene la declaración de todas las variables que se vayan a usar en el programa, es la primera función a ejecutar y sólo se ejecuta una vez, se utiliza para configurar o inicializar pinMode (modo de trabajo de las E/S), configuración de la comunicación en serie y otras. Por otra parte la función loop () es la que contienen el programa con el código que se ejecutará cíclicamente, (lectura de entradas y activación de salidas….).

Se ha implementado una función específica para la configuración de las diferentes opciones, es decir, si mantenemos pulsado durante 2 segundos seguidos el botón Menú, el programa principal se meterá en la función programación de ajustes (setMode en el programa), del reloj, las campanas, señales horarias…

4 DIAGRAMA DE PROCESOS

Para dar solución a todos los objetivos que nos hemos propuesto, elaboramos un pequeño diagrama de proceso pensando en cómo queremos organizar la programación. No se debe olvidar que se trata de un reloj analógico por una lado, por lo tanto debe de existir un reloj externo al Arduino, el cual no dependa de éste para nada, y sea este el que le diga al analógico cuando debe de moverse. Figura 4.

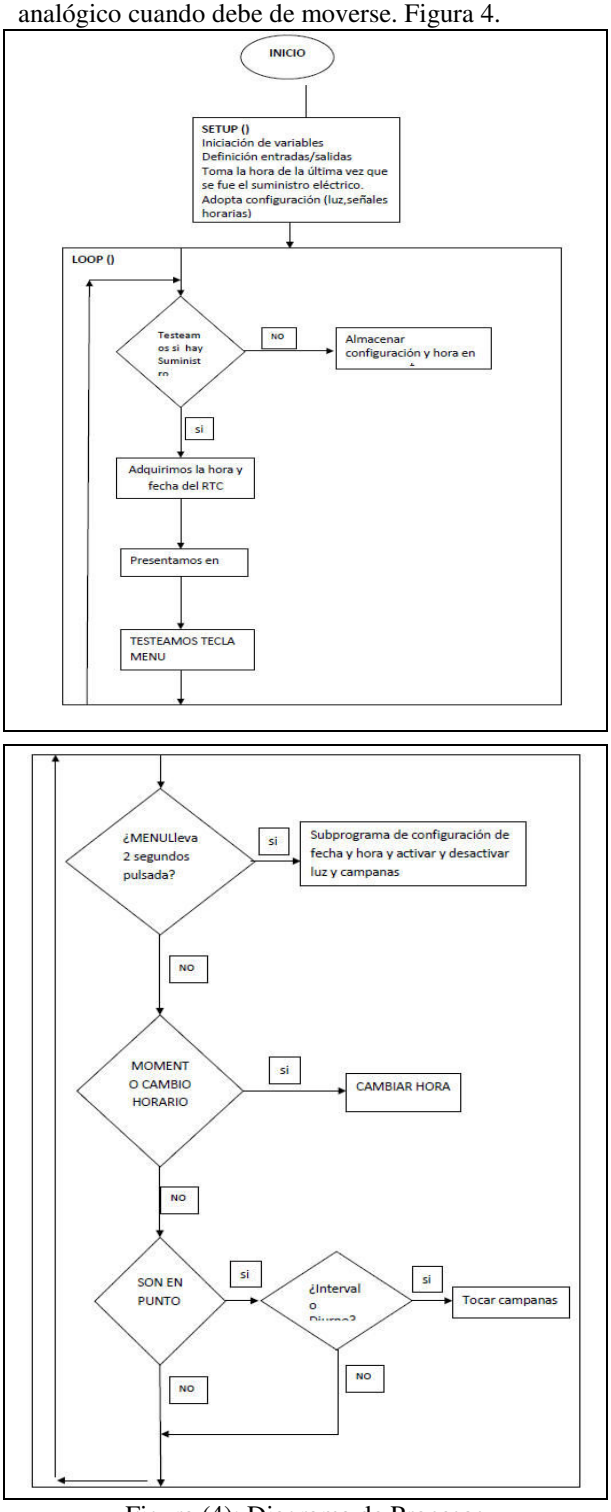


Figura (4): Diagrama de Procesos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El programa consta de 600 líneas de código, dentro de las cuales una de las partes más características son el almacenamiento de las variables en la memoria ROM, y el testeo de la electricidad, y la posterior carga de variables tras la vuelta del suministro eléctrico, todo ello de forma aclaratoria, usando pseudocódigo. Como observación, hay que decir que la ejecución del programa principal solo se interrumpe en caso de que se llame a la función setMode (para establecer los parámetros),

```
void setMode (DateTime now)
{
Instrucciones;
}
```

5 ELEMENTOS UTILIZADOS

5.1- PANTALLA LCD

El módulo que se ha escogido es 2 líneas y 16 dígitos por línea, Figura 5, en el cual presentaremos la fecha y la hora además de la palabra "LUZ", cuando esté seleccionada la opción que se encienda la luz de las esferas cuando haya poca luz exterior, y la palabra CAMP que indicará que las señales horarias están activadas para el intervalo diurno definido por programa. [6]

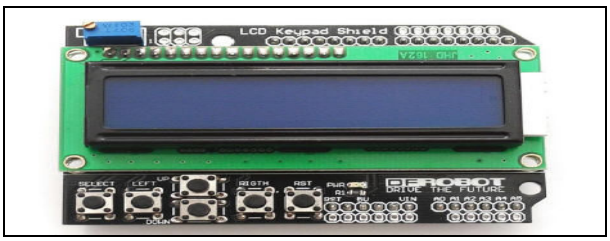


Figura (5): Pantalla LCD 16x2

5.2- RTC - REAL TIME CLOCK

En un reloj necesitamos, ante todo precisión, por lo se ha decidido extraer la variable tiempo al margen del programa de Arduino, para que no sea afectada por los tiempos de programa o por los bucles internos de programación. Por este motivo se ha escogido un módulo el cual una vez configurado de fecha y hora a través de la pantalla inicial nos proporcionará la hora cada vez que se la solicitemos por programa. Este módulo cuenta con una batería modelo CR3021, la cual será encargada de mantener la hora en ausencia de suministro eléctrico. Se conecta a la placa Arduino a través del puerto I2C, con librería propia para las funciones de programación. Este valor queda almacenado, para que en el momento en que el suministro vuelva hacer una resta y adelantar el reloj analógico los minutos correspondientes. Figura 6

5.4- CAJA DE ALUMINIO

Todo el conjunto de módulos junto con el Arduino irán montados en una caja de aluminio, a la cual se la habrá dotado de los pulsadores necesarios para la configuración manual. Se ha elegido una caja de aluminio ya que deberá de aguantar condiciones de temperatura y humedad en ocasiones extremas, pues el campanario no posee condiciones buenas de permeabilidad, etc. Los componentes se han sujetado con tornillos y separadores estando todas las masas conectadas a tierra y a la caja, derivando posibles corrientes parásitas que podrían afectar al RTC. Se han perforados agujeros para poder poner los pulsadores e interruptores necesarios además de hacerse la caja para el display.

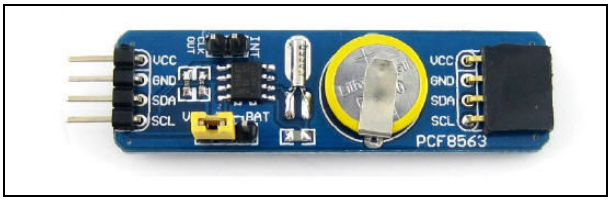


Figura (6): Real Time Clock

5.3- MODULOS RELÉS

Estos módulos son los encargados de formar la etapa de potencia, a ellos irán conectados los diferentes actuadores como son: el motor encargado de mover los 3 relojes de la torre, las campanas y la luz de las esferas. Dichos relés han sido escogidos de manera que la potencia de control de los actuadores sea inferior a lo que estos relés pueden aguantar, garantizando así el correcto funcionamiento de los mismos.

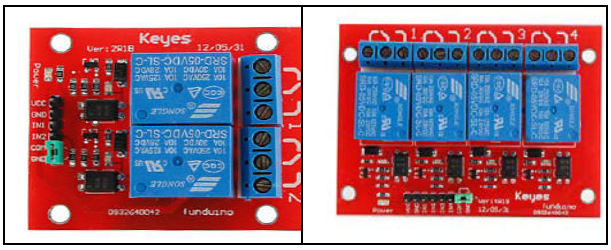


Figura (7): Modulo 2 y 4 relés.

5.5- FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación se ha diseñado para que cumpla un requisito muy importante [7], (si desaparece el suministro eléctrico debe informar al Arduino de ello), este deberá de entrar en una parte del programa en la cual deberá de almacenar en su memoria ROM la hora y los minutos exactos en los que se va la energía eléctrica y además deberá de almacenar la configuración que poseía antes de que el suministro eléctrico se fuese, para poder mantenerla de la misma manera cuando esta vuelva. En ella se incorporará las protecciones adecuadas como fusibles, que se encargarán de proteger todo el circuito Arduino con sus periféricos además del motor que va dentro de la caja de engranajes.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

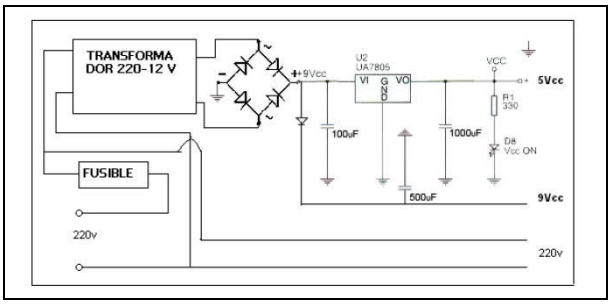


Figura (8): Diseño fuente de alimentación

Las especificaciones técnicas que debe cumplir son las que requiere el propio Arduino, más las que necesitamos para alimentar [8] los módulos relés utilizados. Se diseñará una fuente que nos entregue una tensión de salida de 9 voltios con la que alimentaremos la placa Arduino, y se mantenga el tiempo necesario, para guardar la configuración. Deberá tener otra salida estabilizada de 5 voltios con la cual se alimentarán los módulos relés, además será la encargada de informar por una entrada de Arduino del momento en el que se produce el corte eléctrico.

El diseño se ha realizado en ordenador por medio del programa workbench, y se ha plasmado el diseño en una placa de cobre por el método efectivo de la plancha. Una vez conseguidas las pistas de cobre se las da una capa de estaño para que no las afecte el óxido, de esta manera se mantendrán por un largo periodo de tiempo. Ajustamos el valor del fusible un poco por encima del consumo normal de los actuadores, con lo que si hubiese algún fallo en alguno de los actuadores fundiría rápidamente. Se ha elegido un valor de 500mA.

5.6- ARDUINO ELEGIDO

Tras un primer estudio de las salidas y entras necesarias para este proyecto se ha elegido un Arduino Mega 2560, que es una placa basada en el chip ATmega2560, con 54 entradas o salidas digitales configurables por programa, en este proyecto usaremos 8 o 10 a lo sumo. Posee además 16 entradas analógicas, de las cuales nosotros usaremos 3 para los pulsadores. Posee un oscilador de 16Mhz, que para nuestro proyecto es más que suficiente. Además posee un puerto de comunicación I2C, que nos será muy útil para comunicarse con el RTC.

Aunque las posibilidades de este tipo de Arduino son muchas, y para este proyecto sólo se usen un 20 o 30 %, se ha escogido por la multitud de entradas y salidas, por si en un futuro se quieren aumentar las prestaciones del equipo, etc.

Sus principales características son las que se detallan en la Tabla 1:

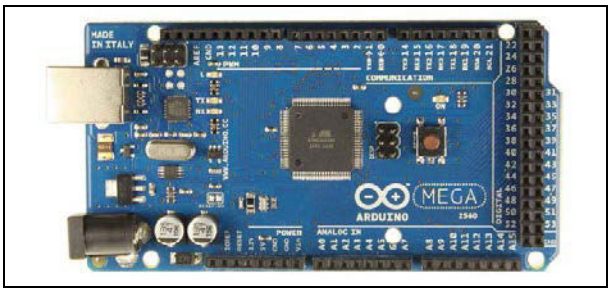


Figura (9): Arduino 2560

Tabla 1: Especificaciones técnicas

Micro controladores	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recom)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (15 PWM)
Pines de entrada analógica	36
Corriente continua para las E/S 5 Pin	40 mA
Corriente de la CC para Pin 3 3V	50 mA
Memoria Flash	256KB(8KB inicio)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Ahora comentaremos los tres principales actuadores [9] (activados mediante los módulos relés) para poder actuar sobre ellos con seguridad.

5.7- CONTACTOR CAMPANA

El módulo de relé encargado de activar las señales horarias activará a su vez un contactor, para aumentar la potencia y éste será el encargado de actuar sobre el solenoide de la campana. El contactor lleva incluido un puente de diodos pues el funcionamiento del electroimán necesita de corriente continua, Figura 10, y es activado por el modulo relé correspondiente. y tal como sea su funcionamiento será necesario realizar la programación de Arduino para la configuración de los tiempos de activación y desactivación para que la campana suene perfectamente.

En la Figura 10, se muestra el electroimán que golpea en la campana, la cual se ha tenido que restaurar pues los largos periodos de inactividad expuestos a las condiciones meteorológicas habían estropeado su mecanismo.

Figura (10): a) Contactor y b) Electroimán Campana

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5.8- CAJAS DE ENGRANAJES

El modulo relé encargado de mover el reloj de torre será el que más tiempo esté funcionando, pues deberá de activarse 60 veces a la hora, el tiempo correspondiente a un ángulo de un minuto de las agujas del reloj. El detector de ángulo no es más que un pulsador que va alojado en la caja de engranajes y que se activa o desactiva cada vez que se avanza 6º que es el ángulo correspondiente a un minuto.

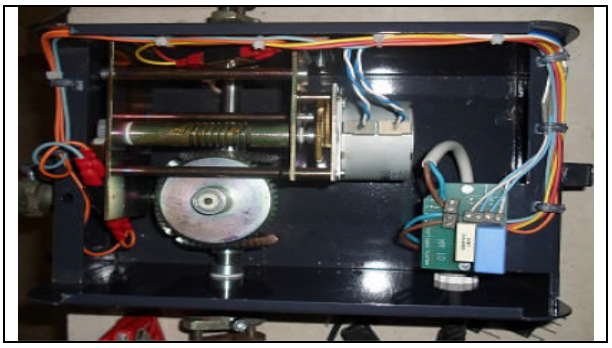


Figura (11): Caja de engranajes

Dicha caja de engranajes es el único mecanismo que se ha mantenido del reloj antiguo, con las modificaciones correspondientes para adaptarle a nuestras salidas, una señal de neutro y dos señales de fase para el avance en un sentido y en otro, al igual que se le han sacado 3 hilos del que denominamos detector de ángulo, el cual se compone de una señal a nivel lógico algo, que conmutará entre 2 posiciones para detectar los pulsos, e informar al Arduino.

5.9- LUZ DE LAS ESFERAS

Este módulo conectará 3 bombillas de bajo consumo, o de tipo led, encargadas de alumbrar las esferas por la parte de atrás, el consumo de estas bombillas es bastante bajo por lo que las podemos conectar directamente al módulo relé. Anteriormente este proceso se realizaba con un temporizador que se alojaba en el cuadro general de maniobra, y se activaba independientemente de la intensidad luminosa exterior, de esta manera no será necesario programar el temporizador ya que la luz se activará solamente el tiempo necesario, no siendo necesario hacer reprogramaciones del temporizador en verano y en invierno.

5.10- ESQUEMA DE CONEXIONES

La pantalla LCD va conectada a la placa Arduino directamente, aunque la conexión podría haberse hecho directamente, al frontal de la caja de aluminio, se ha hecho a través de una faja de hilos.

El RTC, va alimentado a través de los cables rojo y negro con una tensión de 5 Vdc, y por medio de los cables verdes y violetas a los pines SDL Y SDA.

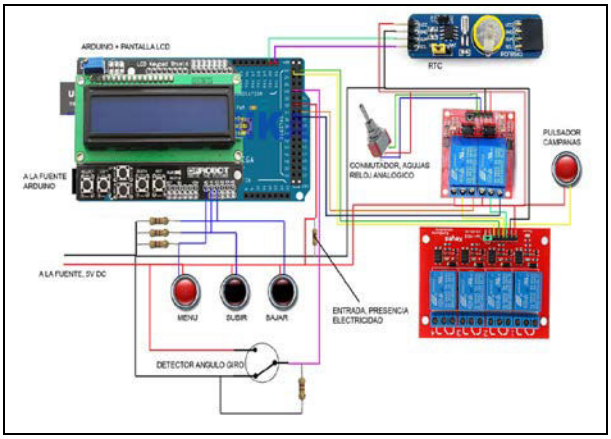


Figura (12): Esquema conexiones

Todos los módulos reciben la alimentación directamente desde la fuente de alimentación, con lo cual se consiguen dos propósitos: no sobrecargar la tarjeta de Arduino y además que al estar conectados todos los módulos a la misma salida de la fuente cuando la electricidad desaparezca, esta salida será la primera que caiga a 0 voltios, con lo cual nos avisará antes al Arduino de que ha desaparecido la electricidad.

Podemos apreciar esta conexión a través de una resistencia en la Figura 12, con la designación “Entrada presencia de electricidad”. De igual manera están conectados los pulsadores a la placa de Arduino, conectando una resistencia denominada pull-up, con lo que se consigue proteger a las bases de los transistores internos de las entradas del Arduino.

El detector de “Angulo de giro”, no es más que un interruptor de fin de carrera conectado a una leva que indica el giro correspondiente a un minuto, o lo que es igual a 6º. Este será el encargado de avisar al Arduinoio de que se ha desplazado lo equivalente a un minuto

El primer módulo compuesto por dos relés, en estado reposo me comunica las salidas del Arduino correspondientes al desplazamiento de las agujas en sentido horario y anti horario, con el módulo de 4 relés correspondiente a dicho movimiento. Por otro lado el módulo de 2 relés está conectado al conmutador manual, cuando se activa este, desactiva las salidas del Arduino dejándolas inhabilitadas y activa el relé correspondiente al movimiento horario o anti horario seleccionado. De esta manera inhabilitamos las salidas de Arduino para que no pueda darse el caso de que nosotros manualmente estemos haciendo girar las agujas del reloj en un sentido y el Arduino nos le haga girar en el otro sentido, con esto evitamos cortocircuitos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El módulo de 4 relés será el módulo de control de potencia, donde pasamos de un control de señales de 5 voltios, a un control de las señales de 220 voltios. El primer relé empezando por la derecha será el encargado de mover las agujas en sentido horario, el segundo será el de anti horario, el cuarto relé será el encargado de activar las campanas, que como vemos este relé puede activarse a través de la salida de Arduino y en paralelo con un pulsador que se ha incorporado por si en algún momento determinado se desean tocar las campanas de forman manual. El tercer relé se encargará de encender la luz de las esferas cuando la intensidad lumínica en el exterior del campanario sea menor a un valor de referencia programado por programa. Esta conexión se hace en conjunto con la fuente de alimentación donde se ha dejado soldado un conector para enchufar la resistencia LDR y poder llevarla fuera del campanario mediante un cable, de esta manera la luz que recibe ésta es sólo ambiental.

En la Figura 12, se especifican las conexiones de 220 Vac, de manera que se envía directamente desde la fuente de alimentación el neutro de los actuadores, siendo la fase lo que se controla con los relés. El cable neutro es el azul que sale directo desde la fuente, siendo la fase el coloreado con un marrón clarito, como podemos ver entra en el contacto común de todos los relés.

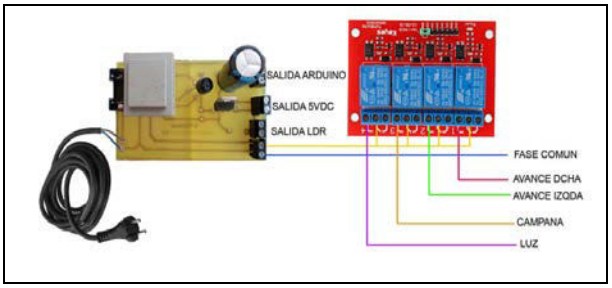


Figura (13): Conexión de potencia

En el contacto normalmente abierto de los relés, se conecta la fase que hará actuar a dicho actuador. La corriente de funcionamiento que nos permite la conexión y desconexión de los relés es 220Vac a 10A, muy superior a lo que consumen nuestros actuadores, con lo que aseguramos un funcionamiento estable y duradero por mucho tiempo.

6 REALIZACIÓN DEL EQUIPO

Una vez estudiado cuales son los componentes que van a formar parte del proyecto procedemos a montarlos haciendo el diseño en la caja de aluminio, de manera que queden de una forma óptima aprovechando bien el espacio y de manera compacta.

- Diseñamos la colocación de los componentes, de manera que todo quede visualmente intuitivo y con una buena apariencia.
- Colocamos los componentes que van alojados en el interior de la caja de aluminio, dejando espacio para la fuente de alimentación que realizaremos.
- Atornillamos todos los componentes mediante separadores a la parte de debajo de la caja de aluminio, y los conectamos eléctricamente.
- El display, los pulsadores y el conmutador serán atornillados con las tuercas con las que vienen a la parte frontal de la caja quedando todo más o menos como se muestra en la siguiente imagen:

6.1- PROBLEMAS ENCONTRADOS

En este apartado comentaremos los principales problemas que se han encontrado a la hora de realizar este proyecto.

Inicialmente se llevó a cabo una gran parte de la programación sin dificultad alguna, haciendo que el reloj funcionase sin mucho detalle, fue después cuando se quisieron redondear detalles, como en el momento en el que debían sonar las campanas, esta parte debía hacerla sin que se parase la ejecución del programa, es decir mientras estaban sonando las campanas el reloj debía seguir mostrando la hora en la pantalla LCD, y debía quedar de manera que pareciese que el microchip ATmega, estuviese realizando dos tareas al mismo tiempo.

Cuando se consiguió que el reloj funcionase perfectamente, se dispuso a dejarle funcionando de seguido unos días, donde se apreció que tanto el reloj digital como la parte analógica se retrasaba, y además no lo hacían en la misma proporción.

Figura (14): Armario

La parte digital, se solucionó cambiando el módulo RTC, pues aunque el fabricante aseguraba una variación de un par de minutos anuales, en este proyecto se detectó que podía tener un retraso de unos 45s por día, algo no tolerado para un reloj de esta índole. El nuevo RTC, con una diferencia casi inapreciable en el coste, venía con una garantía del fabricante que nos llegaba a asegurar que estando alojado en una caja metálica como donde se iban a alojar todos los componentes del reloj, nos aseguraba que podría tener una variación de unos 45 o 50

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

segundos anuales. Algo tolerable para este trabajo.

El problema que más tiempo llevó fue el estudio del retraso de la parte analógica. Se empezó sospechando que podían ser rebotes en el sensor del ángulo de giro, que falseara la lectura del Arduino, por lo que se le introdujo en la programación unas variaciones para evitar los rebotes, y visto que en el lugar de diseño funcionaba correctamente se llevó al ayuntamiento. Pero una vez instalado volvió a fallar, se volvieron a realizar cambios en la programación para analizar los rebotes, se hicieron prototipos de agujas que simularan la carga que poseía en su lugar de trabajo, se estudió el desgaste de los engranajes, tanto de la caja de engranajes como de las agujas que quedaban en la torre.

Pero ¿Qué podía provocar un retraso, y encima no constante, solamente en la parte analógica?, ¿y además sólo en la torre del ayuntamiento? se empezó a pensar en micro cortes eléctricos, y aunque fue difícil estudiarlo pues los polímetros no lo detectaban, se hizo la prueba intercalando un SAI con salida regulada, entre la toma de corriente y el reloj, y se resolvió el problema. Llegados a este punto para no tener que depender del SAI, se realizaron unas modificaciones en la fuente de alimentación, que consistían principalmente en la adición de condensadores en el secundario del transformador.

7 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.

En cuanto a las conclusiones que podemos extraer del presente trabajo tenemos:

1) El reloj funciona correctamente, efectuando todas las operaciones programadas
2) Se produce la correcta puesta en hora tras un corte de electricidad.
3) Se produce el correcto ajuste horario en los cambios de horario de verano y de invierno.
4) Se realiza el toque de campanas a las horas en punto, durante el intervalo diurno programado.
5) Tiene en cuenta el toque de campanas a las 00:00 de la noche de cada 1 de enero.
6) Y lo más importante para el usuario final, una programación de las funciones básicas de forma sencilla y de manera muy intuitiva comparado todo ello con la dificultad que tenía el sistema anterior, éste se tarda en poner en hora aproximadamente 30 s.
7) Podemos afirmar que hemos conseguido todos los objetivos, además se ha conseguido realizar de una forma económica que era otro de los intereses buscados.

En cuanto a las líneas futuras de trabajo, que ya están fijadas, y en algunos casos se están realizando avances interesantes son:

1) En vez de depender del RTC para obtener la variable tiempo, dotar al reloj de un Shield Ethernet, y conectarle a Internet, y a través de un servidor SMNTP, y obtener la hora por ejemplo una vez al día y actualizarle, de manera que no haya retraso alguno.
2) En cuanto al hardware se refiere aparte del Shield ETHERNET, con un sensor que realimente la posición de las agujas, por ejemplo el paso por 12, sería más que suficiente, por el contrario se podría prescindir del RTC.
3) Hay que tener en cuenta, que aunque cada vez son más fiables las nuevas tecnologías, podría darse el caso de que cuando fuera a actualizarse a través de Internet, no dispusiéramos de dicho servicio por un corte.

Referencias

[1] Hugh Blemings, J. O. (2010). Practical Arduino Cool Projectts for Open Source Hardware, Technology in Action,

[2] Massimo Banzi (2012) Introducción a Arduino, la revolución del hardware libre en el diseño Industrial y el arte interactivo, Anaya, 2012.

[3] Torrente Artero, O (2013): Arduino Cursos Prácticos de Formación, Alfaomega, 2013.

[4] Página oficial de Arduino: http://www.**arduino**.cc (último acceso 30-06-2014)

[5] Página de electrónica donde se elaboran pequeños proyectos con Arduino http://electronicavm.wordpress.com/ (último acceso 30-06-2014)

[6] Página que presenta modos de programar el display http://www.adafruit.com/blog/2012/12/14/tutorial-arduino-lesson-11-lcd-displays-part-1-2/ (último acceso 30-06-2014)

[7] Página donde se diseña una fuente de alimentación http://forum.arduino.cc/index.php?topic=56768.0 (último acceso 30-06-2014)

[8] Fulgencio et al. Montilla Meoro (1997) Fuentes de alimentación, Universidad Politécnica de Valencia

[9] Página adquisición componentes electrónicos: https://www.electan.com/ (último acceso 30-06-2014)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Reconfiguración de sistemas de control basado en multiagentes

Rafael Priego, Unai Gangoiti, Darío Orive, Marga Marcos
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
{rafael.priego, unai.gangoiti, dario.orive, marga.marcos}@ehu.es

Resumen

Los sistemas de fabricación actuales deben ser capaces de hacer frente a continuos cambios en los requisitos de las aplicaciones en términos de complejidad, extensibilidad y dinamismo. Con el fin de cumplir este objetivo, los sistemas de fabricación modernos necesitan proporcionar un mayor grado de flexibilidad. En este sentido, el uso de técnicas de ingeniería de software ayuda a los nuevos sistemas de fabricación a proporcionar la capacidad de diagnóstico y reconfiguración necesarias. En este artículo se presentan los primeros pasos de una arquitectura de supervisión basado en un sistema de multiagentes (MAS) que permite automatizar la reconfiguración del sistema obedeciendo a diferentes criterios. La supervisión puede tener diferentes objetivos que están relacionados con el cumplimiento de algún requisito de calidad de servicio, como por ejemplo, asegurar la disponibilidad del sistema de control ante fallos de controladores, balance de carga entre los controladores disponibles o eficiencia energética. En concreto, en este trabajo se presenta el núcleo de la arquitectura, que consiste en ofrecer los mecanismos necesarios para trasladar el control de una parte de la planta entre los controladores existentes en el sistema. Concretamente, se aplica al caso de la disponibilidad del sistema de control.

Palabras Clave: reconfiguración, balance de carga, disponibilidad, sistema multiagente.

1 Introducción

La crisis económica está teniendo un fuerte impacto sobre la inversión de la industria en el campo de los equipos de producción y procesado, y de manera particular en la ingeniería de los sistemas de fabricación. En este sentido, se presenta para los sistemas de fabricación el desafío de ser suficientemente flexibles y al mismo tiempo, robustos, fiables y rentables [1]. Con el fin de abordar este reto se han integrado, por un lado, maquinaria inteligente y, por el otro, arquitecturas que proporcionan a los sistemas de fabricación las habilidades de implementar sistemas de producción seguros, eficientes, precisos y flexibles [2].

En los últimos años se han publicado diferentes aproximaciones que implementan mecanismos de reconfiguración, en los nuevos sistemas de fabricación. El uso de este tipo de mecanismos permite alterar la configuración del sistema de una manera rápida y rentable, sin la necesidad de detener el proceso de fabricación. El cambio entre configuraciones permite mantener la eficiencia del sistema frente a cambios de la demanda o eventos inesperados, como fallos o interrupciones en el proceso.

Durante los últimos años, se han realizado trabajos orientados a integrar Sistemas Multiagentes (MAS) [22] en los sistemas de fabricación y no sólo para reconfiguración sino también para cumplir con diferentes requisitos. En [21] se identifican los retos y líneas de investigación el uso de MAS en aplicaciones de automatización de procesos industriales. Entre ellos cabe desestancar, control basado en agentes [10], diseño concurrente [16], planificación de procesos colaborativos [24], y planificación dinámica basada en agentes [14], [17] (que puede considerarse como un tipo de reconfiguración de alto nivel o nivel de producción).

Por otra parte, es bien sabido que el uso de tecnología MAS no es adecuada para aplicaciones de control con requisitos de tiempo real [19]. En este sentido, existen trabajos como MAGIC [12] donde solventan este problema definiendo 2 niveles de supervisión, siendo el que está controlando el proceso determinista y el superior, con el que se puede comunicar, en el que se realizan labores más complejas que no tienen requisitos temporales estrictos. Además este nivel superior se encarga también de las tareas de diagnóstico y la gestión de las interacciones entre agentes distribuidos, cuyo objetivo es mejorar las prestaciones globales del sistema. El nivel superior está compuesto por agentes que realizan las labores más complejas que requieren de mayor procesamiento y tiempo de CPU así como las tareas de diagnóstico y la gestión de las interacciones entre agentes distribuidos. En esta línea

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

también existen plataformas como AMES [19], plataforma basada en MAS que se centra en la en la optimización de recursos de forma que las hace aptas en aplicaciones de tiempo real, aunque no siguen el estándar propuesto por la Fundación para Agentes Físicos Inteligentes (FIPA) [7].

Otros trabajos se han orientado a incorporar los agentes en el propio código del PLC: [20] propone una arquitectura de agentes que se ejecuta sobre el propio PLC y [18] implementa un agente dentro del código del PLC para enviar datos relevantes durante la ejecución.

Con el objetivo de lograr la reconfiguración, la mayor parte de los trabajos se han implementado utilizado el estándar IEC 61499 [6], que a pesar de no estar tan extendido en la industria como el IEC 61131-3 [5] es mucho más flexible. Entre los trabajos basados en IEC 61499 se encuentran [4], [11], [23] orientados a proporcionar la reconfiguración mediante el cambio de las conexiones de los Bloques Funcionales (FB), alterando la funcionalidad agregando o quitando FBs dinámicamente.

Otros trabajos se centran en el estándar IEC 61131-3 Así por ejemplo en [9] se compensan fallos inesperados a nivel del sistema de control.

En este artículo se propone una arquitectura MAS que consta de dos niveles: en el nivel inferior, un conjunto de agentes distribuidos se encargan de supervisar que el sistema de control está disponible en todo momento y dialogan entre ellos cuando se detecta un fallo de controlador para recuperar la funcionalidad completa siendo esta su funcionalidad primaria. Por otro lado, los agentes del nivel inferior pueden recibir comandos del nivel superior de supervisión, para aceptar / liberar la funcionalidad que supervisan. El sistema supervisor de alto nivel es el encargado de decidir las acciones de reconfiguración a ejecutar, basándose en el estado del sistema y los requisitos de QoS. La reconfiguración se obtiene "transportando" el control de una parte de la planta de un controlador a otro.

En el apartado 2 se describe la arquitectura del sistema de reconfiguración basado en MAS, que asegura la disponibilidad del sistema de control en presencia de fallos de controladores. El apartado 3 ilustra la utilización de dicha arquitectura en un caso de estudio de célula de fabricación de mecanismos rotatorios. Finalmente, en la sección 4 se enumeran las conclusiones y las líneas de trabajo futuro.

2 Arquitectura de reconfiguración basada en MAS

La arquitectura presentada es una continuación del trabajo realizado en [15]. Este trabajo previo presenta una arquitectura centralizada, basada en un middleware flexible propio [3] conforme al Service Component Architecture (SCA) [13]. El objetivo se centraba en asegurar la disponibilidad del sistema de control ante fallos en los PLCs mediante el envío al componente central del aviso de que el PLC está vivo y el estado de ejecución. Si se detecta una caída el componente central selecciona otro PLC con posibilidad de ejecutar la misma funcionalidad a partir del último estado conocido.

La nueva arquitectura presentada en este artículo mejora la flexibilidad en dos aspectos, por un lado la capacidad de que sean los propios agentes distribuidos en los PLCs del sistema los que detecten un controlador en fallo y negocien entre ellos cual será el que asuma la funcionalidad asociada. Por otro, permite la inclusión de un nivel de supervisión superior con objeto de que la reconfiguración este lanzada por requisitos de calidad de servicio (QoS). Con el fin de permitir la asignación dinámica del control a los diferentes PLCs, cada controlador candidato a ejecutar la funcionalidad de una parte del proceso debe contener el código correspondiente.

De esta forma, un PLC puede aceptar hasta un máximo de N sub-sistemas de control. En tiempo de ejecución, dichos sub-sistemas de control pueden estar activos, controlando una parte del procesos, ó en modo seguimiento, supervisando que el controlador activo está en operación y recibiendo el estado correspondiente.

En la arquitectura que se propone, cada sub-sistema de control en un PLC tiene un agente asociado. Estos agentes están basados en un agente genérico que implementa una máquina de estados finitos (FSMBehaviour) cuyos estados corresponden a los comportamientos en los que se puede encontrar un agente durante su ejecución así como la transición entre ellos. Esta máquina de estados finitos se presenta en la Figura 1.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

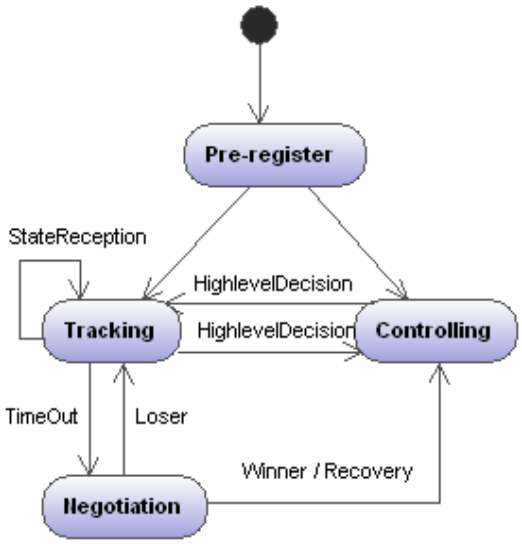


Figura 1 Diagrama de estados

Todos los agentes del sistema inician en el estado *Pre-register* (PS). Un agente permanecerá en este estado mientras se realizan las tareas de inicialización y mientras no se cumplan condiciones prefijadas necesarias para su arranque en modo *Tracking* o *Controlling*. Solo un agente de todo el sistema se iniciará en el estado de *Controlling* por cada una de las partes del proceso. Los agentes que evolucionan al estado de *Controlling* son conocidos como *Active Agent* (AA), ya que están asociados a funcionalidades activas, y los agentes que evolucionan al estado de *Tracking* son conocidos como *Backup Agent* (BA) ya que están asociados a una funcionalidad de seguimiento.

Los agentes forman grupos dependiendo de la funcionalidad que implementan, de forma que a un grupo pertenecen todos los agentes que implementan la misma funcionalidad. Por lo tanto, cada grupo de agentes está compuesto por un AA, y uno, varios o ningún BA.

En la Figura 2 se presenta un ejemplo con dos grupos de agentes. El grupo de la funcionalidad1, cuenta con un solo AA en el PLC1 (sin agentes de respaldo) y el grupo de funcionalidad 2, que cuenta con un AA en el PLC2 y un BA en el PLC1.

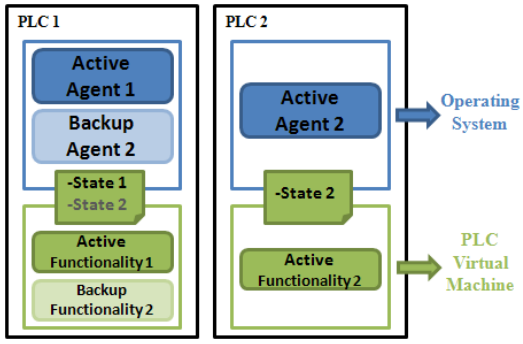


Figura 2 Grupos de agentes

Los agentes activos y los de respaldo se diferencian únicamente en el estado en el que operan. Un AA opera en el estado *Controlling* (CS) y los de respaldo se encuentran en *Tracking* (TS) o *Negotiating (*NS*)*.

Los distintos estados y sus transiciones están diseñados con el fin de mantener la disponibilidad del sistema de control sin la necesidad de hacer uso de un supervisor de alto nivel, pero además, podrían atender a decisiones de reconfiguración del supervisor de alto nivel. La disponibilidad se garantiza mediante una negociación entre los BAs de un mismo grupo cuando el grupo detecta la perdida del AA correspondiente. La negociación de los BAs determina cuál de ellos asumirá el control de la funcionalidad que ha fallado.

Cada uno de los estados del agente tiene asignada distintas acciones con el fin de proporcionar la movilidad de la funcionalidad y mantener la disponibilidad.

En el estado *Controlling* (CS) los agentes extraen los valores de las distintas variables que conforman el Estado de Ejecución (ES). El ES se compone de los valores de las variables relevantes de la funcionalidad a la que está asociado. Cuando en el AA se han obtenido los valores de todas las variables que forman el ES, estos valores son enviados para su actualización a los BAs que se encuentran en el mismo grupo que el AA. Esta acción se ejecuta cada ciclo de ejecución del PLC, ya que el ES de los agentes de respaldo debe contener los valores actuales en cada momento para poder reanudar la ejecución del AA en caso de fallo.

Un agente operando en estado *Tracking* (TS) recibe periódicamente el Estado de Ejecución (ES) del AA de la funcionalidad y la almacena para ser usado en el caso de una reconfiguración. La recepción del ES se utiliza también como el *Heartbeat* (HB) del AA, ya que es un mensaje que se recibe de manera periódica y con un periodo establecido. El fallo del AA del grupo es detectado cuando el ES no se recibe en un tiempo límite (su plazo), conocido como *Timeout,* que desencadena la transición del agente de TS al estado *Negotiaton* (NS). Las acciones de actualización del ES durante el TS se ejecutan cada vez que llega un nuevo mensaje. Y la transición a TS se dispara cuando se alcanza el tiempo límite prefijado.

El estado *Negotiaton* (NS) se inicia cuando un agente activo esta en fallo. En el estado NS los distintos BAs inician una negociación con el fin de decidir cuál de ellos será el agente que asumirá la ejecución de la funcionalidad. La decisión se calcula mediante un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

algoritmo que esta basado en el tiempo de ciclo de cada uno de ellos. El tiempo de ciclo es la media del tiempo que tarda el run-time del PLC en ejecutar todas las funcionalidades activas que tiene asociadas. Por lo tanto, se puede utilizar este valor para estimar la carga relativa a la que está sometido cada uno de los PLCs.

Durante esta negociación, todos los agentes de respaldo envían su tiempo de ciclo a los demás participantes y será el agente con el menor valor el que resulte vencedor. Este agente cambiará su estado a *Controlling*, convirtiéndose en el nuevo AA del grupo. Mientras que los agentes que hayan perdido la negociación regresaran al TS.

En la transición de NS a CS, el agente ganador realiza un diagnóstico del estado de ejecución y determina el tipo de recuperación a realizar. Tal y como se explica en [15] el diagnóstico previo a la reanudación determina el tipo de recuperación a realizar (recuperación directa, a estado conocido o no recuperable) tras lo cual se realizan las acciones asociadas y el control se recupera.

Las transiciones entre el estado *Tracking* y el estado *Controlling* pueden dispararse por *Decisiones de Alto nivel* (HLDs), permitiendo al supervisor modificar el estado de cada uno de los agentes. El supervisor de alto nivel no es objeto del trabajo presentado en este artículo.

3 Caso de estudio

Se ha implementado un prototipo utilizando el Framework de Desarrollo de Agentes Java (JADE) [8]. Como se ha explicado en el apartado anterior, los agentes activos y los agentes de respaldo se implementan mediante un agente genérico simple, que puede operar en un estado T*racking* para los agentes de respaldo o un estado *Controlling* para los agentes activos.

Los estados y las transiciones entre ellos se definen mediante los comportamientos de máquinas de estados finitos (FSMBehaviour) proporcionados por JADE. FSMBehaviour proporciona métodos para registrar subcomportamientos como estados FSM y definir las transiciones entre ellos.

En el caso de las tareas correspondientes al estado *Tracking,* se han implementado utilizando un comportamiento *message handler* que ha sido extendido con la capacidad de atención a *Timeout*. La transacción al estado *Negotiating* se dispara cuando llega el *Timeout*. Las acciones a ejecutar en el estado *Controlling* se han implementado mediante un sub-comportamiento cíclico. Finalmente, las acciones ejecutadas durante el estado de negociación se han implementado extendiendo el comportamiento básico mediante código personalizado.

El prototipo ha sido validado controlando la línea de montaje localizada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, en la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea. La estación es una FMS-201 de SMC. La arquitectura está compuesta por tres Soft-PLCs (Beckhoff CX1020). Las comunicaciones con la estación se implementan sobre un maestro Profibus (basado en un PLC de Siemens) debido a las limitaciones de Profibus. La comunicación entre el PLC Beckhoff y el PLC Siemens se consigue sobre TCP/IP. En la Figura 3 se muestra una visión del escenario general.

Para comunicar los agentes con sus correspondientes funcionalidades en la máquina virtual del PLC, se ha utilizado la librería ADS de Beckhoff. Esta librería permite leer y escribir desde y hacia la memoria de la máquina virtual del PLC.

El PLC1 ejecuta la funcionalidad de control de la estación y su funcionalidad activa; esto significa que está ejecutando el agente activo correspondiente a su funcionalidad. El PLC2 y el PLC3 ejecutan la funcionalidad de la estación como las funcionalidades de respaldo con los correspondientes agentes de respaldo. PLC2 y PLC3 además tienen un *código de simulación* que representa otra funcionalidad que puede estar siendo ejecutada por la máquina virtual del PLC. Modificando el tamaño del *código de simulación* se puede controlar el tiempo del ciclo del PLC.

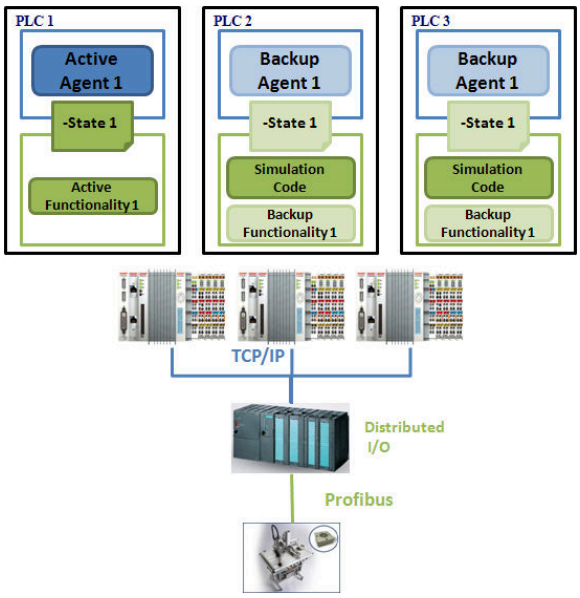


Figura 3. Implementación de la arquitectura

Durante una operación normal. PLC1 estará enviando el ES de la funcionalidad cada ciclo de ejecución. Los otros dos agentes de respaldo, mientras se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

encuentran en el estado *Tracking,* estarán refrescando el estado de ejecución.

Si ocurre un fallo en el PLC1, las funcionalidades de respaldo en PLC2 y PLC3 iniciarán una negociación en la que el PLC con menor tiempo de ciclo será el ganador. Como el tiempo de ciclo puede controlarse modificando la longitud del *código de simulación* en cada PLC, es posible chequear diferentes escenarios. Se han realizado múltiples pruebas con diferentes longitudes del *código de simulación*.

Cuando, tras la negociación, se determina el PLC a activar se realizan las acciones de diagnosis y recuperación. Al finalizar la reconfiguración el sistema se ha restaurado con la funcionalidad ejecutándose en el que era el primer PLC de respaldo y el segundo PLC de respaldo pasa a ser el único PLC de respaldo del conjunto final.

4 Conclusiones y trabajo en curso

Este trabajo propone una arquitectura distribuida basada en MAS, para garantizar la disponibilidad del sistema de control, asignando la funcionalidad a PLCs de respaldo en el caso de fallos o interrupciones. El sistema definido es capaz de detectar fallos, realizando diagnósticos, tareas de recuperación y activando PLCs de respaldo.

La decisión del PLC que sustituye al averiado entre los disponibles se realiza mediante una negociación entre los agentes de respaldo correspondientes a la funcionalidad del PLC averiado. La negociación tiene en cuenta el tiempo de ciclo de cada PLC como factor para la selección.

La ventaja principal de esta arquitectura sobre la presentada en [15], es que la decisión la toman los propios agentes. No es necesario el supervisor. Otra ventaja de esta arquitectura es que la reconfiguración se realiza más rápido debido a que el estado de ejecución se carga previamente en cada agente y no es necesario actualizarlo durante la reconfiguración.

Como se ha explicado, esta arquitectura se ha diseñado como base de una arquitectura más compleja en la que se implementará un supervisor que permitirá asignar funcionalidades en función del estado global y otros requisitos. La extensión de esta arquitectura para cubrir estos objetivos es un trabajo en curso.

Agradecimientos

Parte de este trabajo fue apoyado por el MCYT&FEDER en virtud de la concesión DPI-2012-37806-C02-01, el Gobierno Vasco (GV/EJ) con la subvención BFI-2011-251 y el proyecto IT719-13, además de la UPV/EHU bajo la subvención UFI11/28.

Referencias

[1] Ad-hoc Industrial Advisory Group of the "Factories of the Future", (2010) "Factories of the Future PPP. Strategic Multi-Annual Roadmap", Public-Private Partnership (AIAG FoF PPP), EFFRA & MANUFUTURE – EU

[2] Ad-hoc Industrial Advisory Group of the "Factories of the Future" (2012), "Factories of the Future Strategic Multi-Annual Roadmap Validation Edition". Public-Private Partnership (AIAG FoF PPP), EFFRA & MANUFUTURE – EU.

[3] Agirre, A., Marcos, M. Estévez, E., (2012). "Distributed applications management platform based on Service Component Architecture". *IEEE 17th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*. Krakow, Poland, pp. 1–4.

[4] Brennan, R.W., Fletcher, M. Norrie, D.H., (2002). "An agent-based approach to reconfiguration of real-time distributed control systems". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(4), pp.444–451.

[5] Commission, I.E., (2013). "International Standard IEC 61131-3, Programmable Logic Controllers Part 3".

[6] Commission, I.E., (2004). "International Standard IEC 61499 Part 1".

[7] FIPA - Foundation for Intelligent Physical Agents. Available at: http://www.fipa.org/.

[8] JADE - Java Agent Development Framework. Available at: http://jade.rilab.com.

[9] Legat, C. Vogel-heuser, B., (2014). "A Multi-agent Architecture for Compensating Unforeseen Failures on Field Control Level", Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics, 544, pp.195–208.

[10] Leitão, P., (2009). "Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey". Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(7), pp.979–991.

[11] Lepuschitz, W., Zoitl, A, Vallée, M., Merdan, M., (2011). "Toward Self-Reconfiguration of Manufacturing Systems Using Automation Agents". IEEE Transactions on Systems, Man,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 41(1), pp.52–69.

[12] M. Albert, T. Längle, H.W., (2004). "Real-time requirements in diagnostic systems". In 11th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal processing. pp. 197–203.

[13] OASIS, (2011). "Service Component Architecture", Available at: http://www.oasis–opencsa.org/sca.

[14] Ouelhadj, D. Petrovic, S., (2008). "A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems". Journal of Scheduling, 12(4), pp.417–431.

[15] Priego, R., Armentia, A., Orive, D., Marcos, M., (2013). "Supervision-based reconfiguration of industrial control systems". In 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). IEEE, pp. 1–4.

[16] Shen, W., Norrie, D.H. Barthes, J.-P., (2004). "Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing". C. Press, ed.

[17] Shen, W., Wang, L., Hao, Q., (2006). "Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 36(4), pp.563–577.

[18] Theiss, S. et al., (2006). "PLC-integrated Process Monitoring and Prediction of the Resulting Real-Time Load". In 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE, pp. 880–885.

[19] Theiss, S., Vasyutynskyy, V., Kabitzsch, K., (2009). "Software Agents in Industry: A Customized Framework in Theory and Praxis". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 5(2), pp.147–156.

[20] Ulewicz, S., Schütz, D., Vogel-heuser, B., (2012). "Design, implementation and evaluation of a hybrid approach for software agents in automation". In Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). IEEE, pp. 1–4.

[21] Vyatkin, V., (2013). "Software Engineering in Industrial Automation: State of the Art Review". IEEE Transactions on Industrial Informatics, PP(99), pp.1–1.

[22] Weiß, G., (1999). "Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence", Mit Press.

[23] Xu, Y., Brennan, R. W., Zhang, X., Norrie, D. H., (2002). "A Reconfigurable Concurrent Function Block Model and its Implementation in Real-Time Java". Integrated Computer-Aided Engineering, 9, pp.263–279.

[24] Zhang, W.J. & Xie, S.Q., 2006. Agent technology for collaborative process planning: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32(3-4), pp.315–325.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control de balanceo de carga de un grupo de servidores de red

Miquel Talavera-Foix
CNRS, LAAS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31400 Toulouse France, mtalaver@laas.fr
Carolina Albea
CNRS, LAAS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31400 Toulouse France
Univ de Toulouse, UPS, LAAS, F-31400 Toulouse France, calbea@laas.fr

Resumen

Debido al incremento de servicios en Internet y del número de usuarios, se ha multiplicado la demanda de prestaciones de los servidores web. Si se usa adecuadamente los "clústeres", se puede llegar a una potencia correcta de procesamiento que permita satisfacer los requerimientos. El equilibrado de carga, o "load balancing", permite crear una red robusta y eficiente. En este trabajo se presenta una ley de control distribuido inspirada en la "teoría de consenso". El bucle cerrado asegura la distribución equilibrada de la carga, además de garantizar una estabilidad asintótica. Gracias a un control descentralizado, la carga computacional se reduce y permite que a su vez el sistema sea escalable. Para garantizar la estabilidad local del modelo se hace una estimación de la cuenca atracción. El control distribuido se ha validado mediante simulaciones en Matlab & Simulink y Network Simulator 2.

Palabras clave: balanceo de carga, control por consensus, estabilidad de Lyapunov, dominio de atracción.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los servidores web deben funcionar veinticuatro horas al día, siete días a la semana, con total disponibilidad y fiabilidad. A veces, la potencia de cálculo de un solo servidor no es suficiente para tratar todas las solicitudes entrantes de una página web. Como consecuencia, los usuarios pueden esperar bastante para visualizar la página o incluso puede que no la visualicen a causa de las pérdidas de datos. Por tanto, interconectando un conjunto de servidores de una manera distribuida a través de una red compartida ("clústeres") se puede mejorar significativamente el rendimiento global del sistema [4]. Asimismo, se mejora la escalabilidad de los servidores, resultando una red más segura.

En un sistema distribuido, los servidores trabajan independientemente los unos de los otros. Sus procesadores pueden tener diferentes capacidades así como distintas cargas iniciales. Por razones de seguridad y robustez, se distribuye el flujo de solicitudes entrantes de una manera eficiente, como en el caso de una arquitectura en paralelo [10]. Esta concepción hace que ningún servidor pueda estar sobrecargado mientras haya otros con un nivel de carga inferior. La estrategia que distribuye equilibradamente la carga del sistema se conoce como "load balancing".

La distribución de carga se puede implementar con un controlador descentralizado. Por lo que se requiere un conocimiento preciso del estado de cada servidor y de sus características. El equilibrio de carga evita las pérdidas de datos (sobrecargas) y garantiza que los recursos del sistema se utilicen adecuadamente.

Actualmente, existen diferentes estrategias para realizar una distribución de carga. Algunos métodos actuales se pueden encontrar en [8]. Un tutorial entre las diferentes estrategias tanto estáticas como dinámicas se puede hallar en [7]. Por otro lado, en [11] se encuentran diversas comparaciones entre métodos determinísticos.

Normalmente, la carga computacional de la mayoría de estas estrategias es muy elevada. "Shortest Queue Policy" [12] coloca la solicitud entrante al servidor que tenga una cola de espera inferior. "Shortest Expected Delay" [3] asigna la solicitud entrante al servidor que minimice el tiempo de proceso de la tarea. "Sender-Receiver Initiated Diffusion" [5] transfiere tareas de los servidores altamente cargados a otros más descargados.

Este artículo propone una estrategia de control distribuido para la gestión de la carga en un "clúster" de servidores modificando la tasa ("rate") de entrada. Se ha realizado un estudio teórico y práctico para un caso general, de modo que sea fácilmente implementable en otras aplicaciones. Se ha propuesto un modelo dinámico-determinista y una ley de control distribuido inspirada en la teoría de consenso [9]. Se han realizado varias hipótesis para proponer una primera solución. Por ejemplo: se asume que todos los servidores tienen una misma estructura; que el volumen de trabajo es constante y que todas las solicitudes entrantes pueden ser procesadas por todos los servidores. El obje-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tivo principal de este artículo no es sólo asegurar que el sistema sea seguro, sino también evitar las pérdidas de datos. Se ha conseguido que la carga computacional del sistema disminuya y que el sistema sea escalable. Se comprueba que la carga total se mantiene y que las colas de cada servidor convergen asimptóticamente a un nivel medio. Finalmente se ha validado el modelo mediante simulación en Matlab-Simulink y en Network Simulator 2.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II, se modeliza el sistema y se formula el problema; en la sección III, se presenta la ley de control basada en la teoría de consensus; se realiza una estimación de la cuenca de atracción en la sección IV; se presentan algunas simulaciones en la sección V y finalmente, el artículo termina con una sección de conclusiones y de trabajo futuro.

2. DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA

2.1. MODELO

Vamos a considerar un sistema compuesto por una fuente S que distribuye una tasa entrante constante A sobre un conjunto de servidores N (ver Figura 1). La tasa de carga tratada Y, representa la capacidad de cada procesador y se supone constante. El objetivo de los N servidores no es otro que procesar la carga entrante. Las tasas A y Y se denotan respectivamente:

$$A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{N-1} \ a_N]^T$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N-1} \ y_N]^T.$$

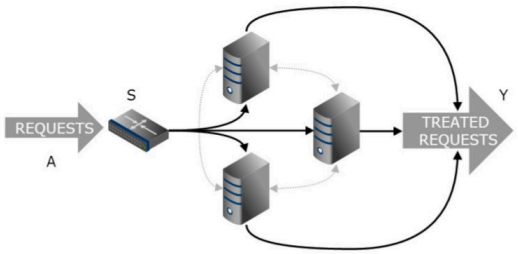


Figura 1: Sistema considerado con $N = 3$ servidores.

Hipótesis 1 *La carga global del sistema se conserva:*

$$\sum_{i=1}^{N} a_i = \sum_{i=1}^{N} y_i.$$

Para procesar correctamente la carga de trabajo de la fuente, se tiene en cuenta la cola de espera de los paquetes que aún no se han tratado. De esta manera, se introduce el estado: *tamaño de la cola*, $q_i \in \Re_{\geq 0}$, donde su variación $\dot{q}_i$ corresponde a la diferencia entre la tasa de entrada, a_i, y la tasa de procesado máximo, y_i. Nota que toda solución $t \mapsto q_i(t)$ tiene que satisfacer que $q_i(t) \in \Re_{\geq 0}$ para todo $t \geq 0$.

Por otro lado, se supone que los servidores tienen diferentes cargas iniciales:

$$q_0 = [q_{0_1} \ q_{0_2} \ \dots \ q_{0_{N-1}} \ q_{0_N}]^T. \tag{1}$$

El modelo en forma compacta es:

$$\dot{q} = A - Y + u, \tag{2}$$

donde u es la ley de control que distribuye la carga.

Problema 1 *Nuestro objetivo es hacer un equilibrado de carga del sistema* (1)-(2).

Nota 1 *Una vez presentados los resultados de esta situación específica, se llevarán a cabo simulaciones para un caso más general donde la tasa entrante varíe en función del tiempo. Para diferenciarlas, la tasa entrante variante se denominará* $A(t)$.

2.2. CONTROL POR CONSENSUS

2.2.1. Conectividad entre servidores

Vamos a definir una matriz de conexión. Para ello se define una matriz adjunta

$$Ad = [ad_{ij}] = \begin{cases} 1 & \text{si } i \neq j, \\ 0 & \text{si } i = j, \end{cases}$$

y una matriz diagonal Δ,

$$\Delta = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j, \\ \sum_{k \in \mathbb{N}, k \neq i} ad_{ik} & \text{si } i = j. \end{cases}$$

Por tanto, la matriz Laplaciana del grafo indirecto resultante es:

$$L = \Delta - Ad. \tag{3}$$

La matriz Laplaciana de un grafo indirecto es simétrica y semi-definida positiva. Representa el grafo completo de la Figura 1.

2.2.2. Ley de control propuesta

El objetivo de este artículo es el de proponer una ley de control eficiente que asigne la entrada u_i a cada servidor i para cumplir la siguiente proposición:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Proposición 1 *Todas las longitudes de cola convergen a un punto promedio:*

$$\lim_{t\to+\infty} q_i = q^*,$$

donde q^* es el punto promedio.

Usando la ecuación del modelo (1)-(2) y la matriz Laplaciana (3), se diseña un controlador dinámico-distribuido que representa el flujo intercambiado entre los servidores.

$$u = -K_p L q + q_c \tag{4}$$

$$\dot{q_c} = -K_i L q, \tag{5}$$

donde K_p y $K_i \in \Re_{\geq 0}$ son las ganancias proporcional e integral, respectivamente. Este control es un algoritmo clásico de consensus para sistemas multi-agentes [9], que asegura que todos los tamaños de las colas convergen a un nivel promedio, q^*.

En el siguiente lema, se presenta una característica importante que define la elección de (4) y (5).

Lema 1 *La ley de control distribuido* (4) *y* (5) *satisface la Proposición 1, que remarca que todos los tamaños de las colas convergen a un mismo valor promedio.*

Prueba 1 *Se establece a partir de aplicar* (3) *en* (4) *y* (5).

2.2.3. Estabilidad en el sentido de Lyapunov

Sea V una función definida positiva:

$$V = q^T L q + \frac{(q_c + A - Y)^2}{K_i}. \tag{6}$$

Su derivada correspondiente es:

$$\dot{V} = 2q^T L\dot{q} + 2\frac{\dot{q_c}(q_c + A - Y)}{K_i}.$$

Si se usa (2) y (5) se llega a:

$$\dot{V} = -2K_p q^T L q \leq 0.$$

Esto implica estabilidad asintótica.

3. ESTIMACIÓN DE LA CUENCA DE ATRACCIÓN

La mayoría de las aplicaciones de control tienen restricciones del sistema (saturaciones, limitadores de la tasa de bits, especificaciones físicas...) que pueden hacer perder el carácter global de la estabilidad. En diseños de control, es usual aplicar la ley de control ignorando las restricciones. Por ejemplo, si la ley de control es $u_d = \alpha(x)$, donde x es la variable de estado, se aplica realmente $u = \gamma(u_d) = \gamma(\alpha(x))$, donde γ es la función de saturación.

Si se trabaja en un dominio donde las restricciones no están activas $\gamma(\alpha(x)) = \alpha(x)$, se mantiene la estabilidad local. No obstante, si existe alguna región "prohibida" en el espacio de estado, se debe asegurar que el sistema no abandone la región "segura". Para considerar estas limitaciones se estima una cuenca de atracción [1]. En [6] se pueden encontrar diversos métodos para la estimación de la cuenca de atracción. Un ejemplo de un inversor "boost" se halla en [2].

Hipótesis 2 *Existe una función de Lyapunov conocida y radialmente no acotada $V(x)$, tal que un conjunto invariante, positivo y compacto Ω, $\frac{\partial V}{\partial x} f(x, \alpha(x)) \geq 0$.*
M es subconjunto invariante del conjunto para el cual $\dot{V} = 0$ en Ω.

Mediante el principio de invariancia de la LaSalle, la Hipótesis 2 garantiza que las trayectorias del modelo sin restricciones tienden a M. Note que la Hipótesis 2 también garantiza estabilidad local.

El modelo propuesto (2) tiene un saturación de la tasa total de entrada:

$$rate_i = u_i + a_i \geq 0, \tag{7}$$

donde $rate_i \in \Re_{>0}$. Toda solución $t \mapsto rate_i(t)$ tiene que cumplir $rate_i(t) \in \Re_{>0}$ para todo $t \geq 0$. Esta restricción se debe a que los servidores tienen una única entrada y una única salida, por tanto el balance de carga se efectuará en la entrada del servidor.

Asumiendo la saturación (7) en el modelo (2), una estimación (conservativa) del dominio de atracción se propone en el siguiente teorema:

Teorema 1 *Asumiendo ciertas las Hipótesis 1 y 2, existe una constante $c > 0$, tal que en el dominio $\Omega_c = \{x : V(x) \geq c^{-1}\}$, la restricción* (7) *se cumplen. Luego, todas las trayectorias del sistema con restricciones, empezando en el dominio Ω_c, tienden a $M \cap \Omega_c$.*

Prueba 2 *Dado que las restricciones se cumplen en Ω_c, los resultados en el sistema sin restricciones son validos en Ω_c. Como consecuencia, $\dot{V} = 0$ en Ω_c y Ω_c son positivos e invariantes. Asimismo, puesto que $V(x)$ es radialmente no acotado, Ω_c es compacto. El teorema se puede validar aplicando el principio de invariancia de la LaSalle.*

Nota 2 *Dado que $M \cap \Omega_c \subset M$, el teorema garantiza el comportamiento asintomático en el sistema con restricciones.*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Usando el Teorema 1, el problema se reduce a encontrar un valor de $c > 0$ tal que (7) se cumple en los puntos donde $V(x) \geq 0$.

Problema 2 *Maximizar* c^{-1}*:*

$$s.a. : V(x) - c^{-1} \leq 0 \qquad (8)$$
$$u_i + a_i \geq 0 \quad i = 1, \ldots, N.$$

Nota que las restricciones se cumplen tanto en los limites de Ω_c como en el conjunto $V(x) - c^{-1} < 0$.

Teorema 2 *Considera el sistema* (2)*, la ley de control* (4) *y* (5)*, la función de Lyapunov* (6) *y la constante* $c > 0$*, entonces el Problema 2 es equivalente a resolver:*

$$\begin{bmatrix} cY^TY & -K_pY^TL & Y^T \\ -K_pLY & Y^TYL & 0 \\ Y & 0 & \frac{Y^TYI_n}{K_i} \end{bmatrix} \geq 0. \qquad (9)$$

Prueba 3 *Definimos:*

$$x_1 \triangleq q \qquad x_2 \triangleq q_c + A - Y, \qquad (10)$$

donde x_1,$x_2 \in \Re^{Nx1}$.
A partir de la ecuación (4)*,* (5) *y* (10)*, se obtiene:*

$$u = -K_pLx_1 + x_2 - A + Y \in \Re^{Nx1}. \qquad (11)$$

La relación (7) *se puede reescribir de la siguiente forma usando* (11)*:*

$$K_pLx_1 - x_2 \leq Y.$$

Multiplicando por la izquierda por $2Y^T$*:*

$$2Y^TY \geq 2Y^TK_pLx_1 - 2Y^Tx_2. \qquad (12)$$

Minimizando c, multiplicando por la izquierda (8) *por* $2Y^TY$*, y a partir de* (12)*, la cuenca de atracción resulta:*

$$2Y^TY \geq cY^TYx_1^TLx_1 + cY^TY\frac{x_2^TI_nx_2}{K_i}$$
$$+Y^TY \geq 2Y^TK_pLx_1 - 2Y^Tx_2.$$

Reescribiendo la última inecuación en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y^TY & -K_pY^TL & Y^T \\ -K_pLY & cY^TYL & 0 \\ Y & 0 & \frac{cY^TYI_n}{K_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \geq 0,$$

y aplicando el complemento Schur se obtiene (9).

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y DE IMPLEMENTACIÓN

Vamos a utilizar los siguientes parámetros:

$N = 5$

$A = [3{,}8\ 4{,}2\ 2\ 3\ 2]^T \cdot 10^3\ pqt/s$

$Y = [3\ 5\ 2\ 2{,}25\ 2{,}75]^T \cdot 10^3\ pqt/s$

$q_0 = [4500\ 4000\ 3500\ 4775\ 4225]^T\ pqt.$

Por simplicidad, se toma:

$$K_p = K_i = 1.$$

Con los valores anteriores, la constante c^{-1} que maximiza la cuenca de atracción es:

$$c^{-1} = 2{,}9328 \cdot 10^7.$$

Con estos parámetros vamos a realizar simulaciones: en Matlab/Simulink, para validar la teoría desarrollada; y en NS2 para validar el controlador en un entorno más realista.

El modelo desarrollado se muestra escalable y robusto en la región segura. No obstante, no se puede asegurar su estabilidad dentro de la región prohibida.

4.1. MATLAB - SIMULINK

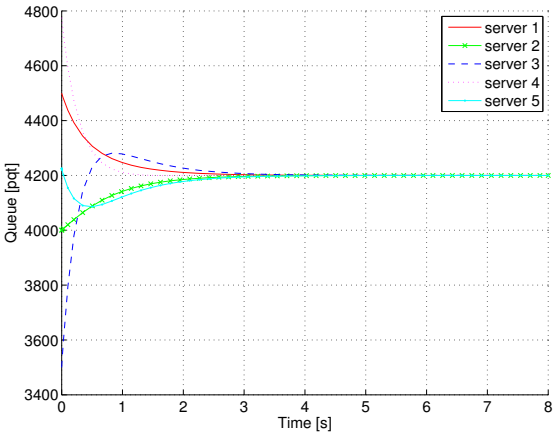


Figura 2: Tamaño de cola i en función del tiempo.

En la Figura 2 se muestra que todos los tamaños de las colas convergen asintóticamente al valor medio $q^* = 4200\ pqt$.

4.2. NETWORK SIMULATOR 2

NS2 es un simulador "open source" de redes tanto cableadas como inalámbricas. Consta de un núcleo principal escrito en C++ y de una interfaz en un lenguaje OTcl, una versión de Tcl orientada a objetos. El usuario describe una topología de red por medio de códigos en OTcl, y luego el programa principal de NS2 simular dicha topología utilizando los parámetros definidos.

4.2.1. Topología de la red

Se han creado $N + 1$ nodos. El nodo extra representar la fuente S.

Los enlaces son unidireccionales y con un ancho de banda que corresponde a la tasa de solicitudes tratadas, y_i. La política de gestión de cola se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

caracteriza como "DropTail", es decir, primero en entrar primero en salir. Por otro lado, los enlaces tienen un tamaño de cola inicial (1) y la capacidad máxima se fija en 10000 *pqt*.

El tráfico se modeliza como "Constant Bit Rate" (CBR), es decir, la tasa de bits es constante durante toda la simulación. Es muy útil para flujos de datos multimedia con canales de capacidad limitada. Este hecho, permite utilizar toda la capacidad. Se ha empleado el protocolo, "Use Datagram Protocol" (UDP), el cual es uno de los principales protocolos en los que se basa Internet. UDP permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión. Tampoco tiene control ni confirmación de flujo.

La fuente UDP es el nodo $N0$ ("Agent/UDP") y las destinaciones son los N servidores ("Agent/Null"). El tamaño de paquetes se considera 125 *bytes*.

Para conseguir un tamaño de cola inicial de (1), el "rate" inicial se configura como:

$$rate_0 = [2{,}55\ 2{,}5\ 1{,}95\ 2{,}6125\ 2{,}3875]^T \cdot 10^4\ pqt/s.$$

El rate inicial se aplica durante 0,2 s. Una vez el tamaño de cola es el deseado, se aplica la ley de control de la forma (7).

4.2.2. Discretización del modelo

Como NS2 es un simulador de eventos discretos, se aplica una aproximación discretizada de la ley de control (4) y (5) mediante el Método de Euler hacia atrás.

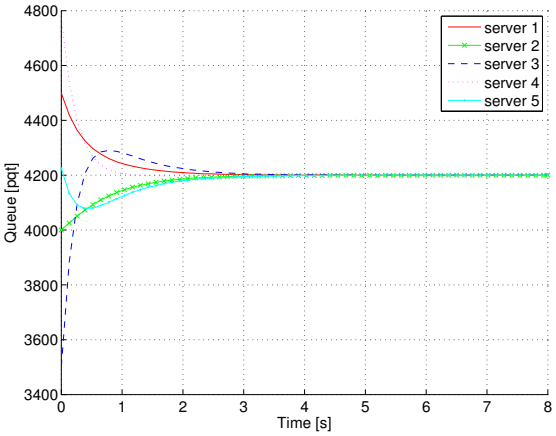
$$u[kT] = u[(k-1)T] - K_p Lq[kT] + (K_p - K_i T) Lq[(k-1)T],$$

donde T es el periodo de muestreo, el cual se fija para las simulaciones en 50 ms.

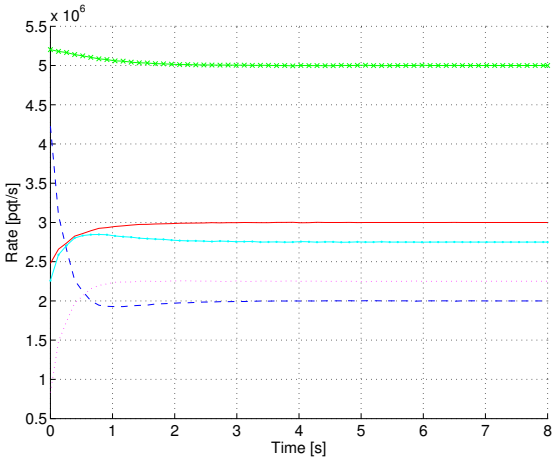
Con la Figura 3a se puede comprobar que la discretización no varia el comportamiento del modelo. Se puede comprobar que se obtiene prácticamente la misma simulación en Matlab/Simulink que en NS2. La Figura 3b muestra como el "rate" es positivo para todo $t \geq 0$, $rate_i(t) \in \Re_{>0}$.

Para crear un entorno más real, se aplica ruido en la aplicación CBR. En este caso, la tasa de entrada es $A(t)$. El sistema converge en cada momento al valor medio de todos los tamaños de cola $q^*(t)$.

La Figura 4a y la Figura 4b muestra que el sistema es robusto.



(a) Tamaño de cola i en función del tiempo.



(b) "Rate" i en función del tiempo.

Figura 3: Simulación en NS2

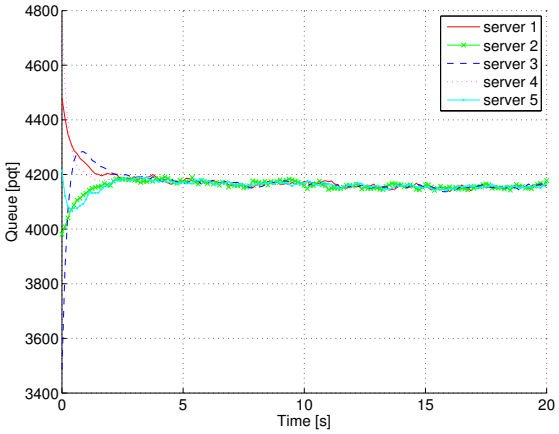
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo propone un control distribuido para un sistema de N servidores. La ley de control basada en la teoría de consensus permite manipular el tamaño de cola de cada servidor con la finalidad de realizar un equilibrado de carga. La carga computacional del sistema es notablemente inferior comparado con otras estrategias de balanceo de carga, por tanto, se reducirán las pérdidas de datos. Asimismo, el sistema se convierte en robusto y escalable. El control distribuido se ha diseñado de forma general para poder ser implementado en grandes estructuras de servidores.

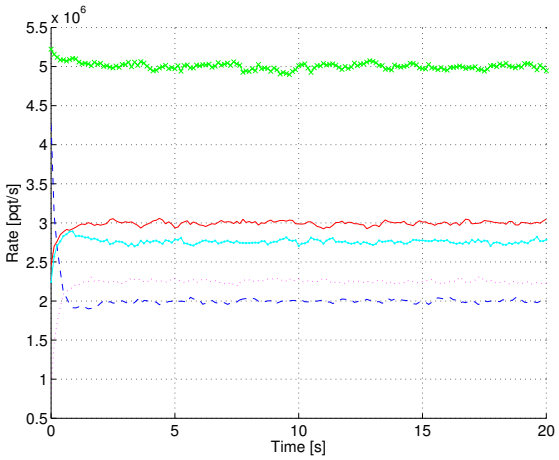
Por otro lado, se ha presentado un método para estimar la cuenca de atracción que tiene en cuenta las restricciones físicas del sistema. El método se basa en estimar una superficie de Lyapunov donde se cumplen las restricciones.

Un trabajo futuro consistirá en considerar los retardos en la transmisión de la información del estado de cada servidor, así como los retardos de la distribución de los paquetes en la red.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Tamaño de cola i en función del tiempo.



(b) "Rate" i en función del tiempo.

Figura 4: Simulación con ruido en NS2

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto CNES la financiación de este trabajo.

Referencias

[1] C. Albea and F. Gordillo. Control of the boost DC-AC converter with RL load by energy shaping. In *Decision and Control, In Proc. of the 46th IEEE Conference on*, pages 2417–2422, Dec 2007.

[2] C. Albea and F. Gordillo. Estimating the attraction domain for the boost inverter. *Asian Journal of Control*, 15(1):169–176, 2013.

[3] S. A. Banawan and J. Zahorjan. Load sharing in heterogeneous queueing systems. In *INFOCOM Proc. of the 8th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Technology: Emerging or Converging, IEEE*, pages 731–739 vol.2, Apr 1989.

[4] W. Becker. Dynamic balancing complex workload in workstation networks-challenge, concepts and experience. In *High-Performance Computing and Networking*, pages 407–412. Springer, 1995.

[5] G. Cybenko. Dynamic load balancing for distributed memory multiprocessors. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 7(2):279–301, 1989.

[6] R. Genesio, M. Tartaglia, and A. Vicino. On the estimation of asymptotic stability regions: State of the art and new proposals. *Automatic Control, In trans. on IEEE*, 30(8):747–755, Aug 1985.

[7] H. Kameda, El-Z.S. Fathy, I. Ryu, and J. Li. A performance comparison of dynamic vs. static load balancing policies in a mainframe-personal computer network model. In *Decision and Control, In Proc. of the 39th IEEE Conference on*, volume 2, pages 1415–1420 vol.2, 2000.

[8] H. Kameda, J. Li, C. Kim, and Y. Zhang. *Optimal Load Balancing in Distributed Computer Systems*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition, 2011.

[9] R. Olfati-Saber, J.A. Fax, and R.M. Murray. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *In Proc. of the IEEE*, 95(1):215–233, Jan 2007.

[10] Z. Tang, J. D. Birdwell, J. Chiasson, C. T. Abdallah, and M. M. Hayat. Closed loop control of a load balancing network with time delays and processor resource constraints. In *Advances in Communication Control Networks*, pages 245–268. Springer, 2005.

[11] M. H. Willebeek-LeMair and A. P. Reeves. Strategies for dynamic load balancing on highly parallel computers. *In Trans. on IEEE Transactions Parallel and Distributed Systems*, 4(9):979–993, 1993.

[12] W. Winston. Optimality of the shortest line discipline. *Journal of Applied Probability*, 14(1):181–189, 1977.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE CONTROL BILATERAL DE 1 GDL CON ARDUINO PARA TELERROBÓTICA

Adrián Peidró, Juan José Rodríguez, José María Azorín, Óscar Reinoso
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández
Avda. Universidad s/n, Edificio Innova
03202 – Elche (Alicante), España
adrian.peidro@goumh.umh.es

Resumen

Se presenta la implementación de una maqueta de bajo coste para la docencia de Telerrobótica. La maqueta permite realizar experimentos de control bilateral posición-posición sobre un par maestro-esclavo de un grado de libertad. El esquema de control se desarrolla sobre un Arduino Mega 2560 que centraliza el control del maestro y del esclavo. Los movimientos del maestro y del esclavo son gobernados por motores de corriente continua, consiguiendo el seguimiento mutuo entre ambos.

Palabras Clave: Telerrobótica, Arduino, control bilateral, posición-posición, maqueta

1 INTRODUCCIÓN

La experimentación práctica con equipos reales además de en simulación es de gran importancia para conseguir que los alumnos asienten los conceptos teóricos impartidos en asignaturas de control automático y robótica. Por ejemplo, muchos estudiantes no comprenden realmente qué es físicamente un PID, ni cuál es su importancia, hasta que no ven uno en funcionamiento en el laboratorio.

Tradicionalmente, los estudiantes han podido experimentar en el laboratorio con equipos didácticos comerciales. En asignaturas de control, existen kits didácticos muy extendidos de sistemas clásicos como el servomotor, el péndulo invertido y el levitador magnético. Dichos kits permiten al estudiante experimentar con el control de tales sistemas a través de los controladores proporcionados por el fabricante o mediante Simulink. En robótica también existen algunos sistemas comerciales expresamente diseñados con fines educativos, como Scorbot [3]. También es una práctica común permitir a los estudiantes realizar experimentos prácticos directamente con robots industriales como el robot IRB-140 de ABB [1].

Desde hace unos años, la enseñanza práctica en asignaturas de automática se ha visto beneficiada por la aparición de sistemas como el kit Mindstorms NXT de robótica de Lego [6] o de plataformas como Arduino [2]. Estos sistemas permiten diseñar de forma muy sencilla y a bajo coste entornos experimentales muy variados. En el ámbito de la robótica, los kits de Lego permiten construir robots con cualquier arquitectura y programarlos. Por su parte, Arduino permite diseñar experimentos de control realmente sofisticados, donde el alumno puede programar esquemas de control tan complicados como quiera. Hay numerosos y variados ejemplos de proyectos de robótica y control de bajo coste desarrollados con Arduino, como un robot móvil con brazo manipulador [5] y la automatización de instrumentos musicales [7].

La ventaja de sistemas como los descritos en el párrafo anterior es que permiten que sea el propio alumno quien construya la maqueta o sistema con el que experimentará, lo cual le permite adquirir una visión global de los sistemas automáticos: además de diseñar un controlador, el estudiante ha de comprender cómo comunicar de forma efectiva dicho controlador con la planta para leer las variables a controlar y para ejercer su acción de control sobre el proceso a controlar. Como desventaja, la ejecución de tales proyectos integrales requiere tiempo y dedicación que en muchas ocasiones no puede exigirse a los alumnos.

En este contexto, este artículo presenta la implementación de una maqueta de un robot teleoperado de un grado de libertad para la realización de experimentos de control bilateral en asignaturas de Telerrobótica. La maqueta consta de un brazo maestro manejado por el usuario y de un brazo esclavo que se mueve en el entorno remoto siguiendo los movimientos del primero. Ambos brazos están controlados por una tarjeta de Arduino MEGA 2560. La maqueta está integrada por componentes de bajo coste y puede utilizarse para diseñar un entorno experimental con el que el estudiante puede realizar prácticas de Telerrobótica.

El resto de este artículo está organizado como sigue. Primero, en la Sección 2 se revisa la Telerrobótica y su esquema de control bilateral más básico. A continuación, la Sección 3 presenta los componentes de la maqueta diseñada. En la Sección 4 se describe la implementación del algoritmo de control en Arduino, y su interacción con el resto de la maqueta. En la Sección 5 se describe el funcionamiento global de la maqueta, y en la Sección 6 se presentan algunos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

experimentos de funcionamiento de la misma. Finalmente, el artículo concluye en la Sección 7, donde también se analizan los trabajos futuros.

2 TELERROBÓTICA Y CONTROL BILATERAL

La Telerrobótica estudia los sistemas en los que un robot es operado a distancia por una persona. Estos sistemas disponen de un robot esclavo que se mueve por un entorno en el que no está presente el operario humano, y de un dispositivo maestro que es empleado por el operario para controlar los movimientos de dicho robot.

Una de las metas de la Telerrobótica es lograr que el operario sienta como si estuviera en el entorno del robot esclavo, de forma que las fuerzas ejercidas por el entorno sobre dicho robot se puedan transmitir hacia la persona y que ésta pueda sentirlas, por ejemplo cuando el robot colisiona con un obstáculo de su espacio de trabajo o cuando el robot agarra algún objeto del entorno. Los sistemas de control de Telerrobótica en los que se proporciona una realimentación de fuerzas desde el robot hacia la persona que lo controla se denominan **bilaterales** debido a que los comandos de movimiento y fuerza no fluyen sólo del operario al robot, sino que el robot esclavo también refleja fuerzas hacia el operario.

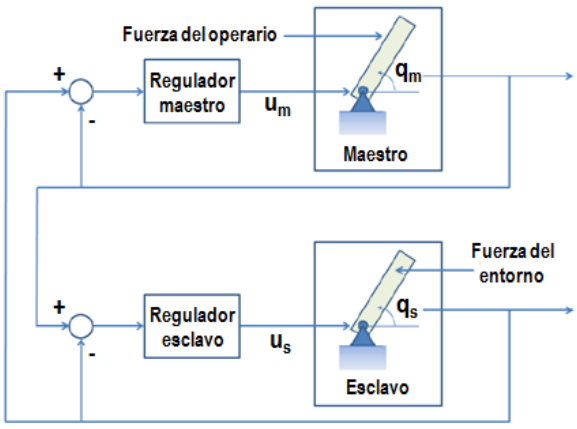


Figura 1: Esquema de control bilateral posición-posición.

El sistema de control bilateral más sencillo en Telerrobótica es el esquema posición-posición, mostrado en la Figura 1. En este esquema, la posición del maestro se emplea como referencia a seguir por el esclavo y viceversa, la posición del esclavo se empela como posición de referencia a seguir por el maestro, de manera que maestro y esclavo se siguen mutuamente. Virtualmente, maestro y esclavo se comportan como si estuvieran conectados mediante un muelle [4]. Por ejemplo, si el esclavo choca con un obstáculo del entorno y ve impedido su movimiento, el operario siente una fuerza en el dispositivo maestro al intentar forzar al esclavo a avanzar en la dirección del obstáculo, pues el esclavo no se mueve y el controlador del maestro tiende a llevar a éste hacia atrás, a la posición en la que se quedó atrapado el esclavo.

En el caso más sencillo, los reguladores empleados en la Figura 1 para que maestro y esclavo se sigan mutuamente son reguladores proporcionales, por lo que las leyes de control quedarían como sigue:

$$u_m = K_m(q_s - q_m) \quad (1)$$

$$u_s = K_s(q_m - q_s) \quad (2)$$

Donde u_i es la acción de control, K_i es la ganancia proporcional y q_i la posición angular, denotando el subíndice *m* al maestro y el subíndice *s* al esclavo.

3 COMPONENTES DE LA MAQUETA DE CONTROL

La Figura 2 muestra de forma esquemática la maqueta de control bilateral diseñada, con todos los componentes de la misma y sus relaciones. Los elementos presentes en la maqueta son:

- 2 motores de corriente continua modelo 2342 012 CR de Faulhaber (m_m y m_s)
- 2 encoders ópticos incrementales de Avago Technologies, modelo HEDS 5540 A (e_m y e_s)
- 2 reductoras formadas por ruedas dentadas de poliacetal (factor de reducción = 6.67) (r_m y r_s)
- 2 tubos de aluminio que ejercen los roles de eslabones maestro y esclavo (b_m y b_s)
- 2 controladoras ESCON 36/2 de Maxon Motors (c_m y c_s)
- Un controlador central formado por una placa Arduino MEGA 2560 y un circuito electrónico de filtrado (c_c)

Cada eslabón (maestro y esclavo) está accionado por un motor de corriente continua a través de una reductora, que amplifica el par del motor. Las posiciones angulares q_m y q_s del maestro y esclavo respectivamente se miden a través de sendos encoders situados en los ejes de los motores. Cada motor está accionado por una controladora ESCON, que actúa a modo de amplificador de potencia de la señal de control calculada por la placa de Arduino, que ejecuta el algoritmo de control posición-posición a partir de la posición leída de los eslabones maestro y esclavo. Seguidamente se describirá este esquema de control más detalladamente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

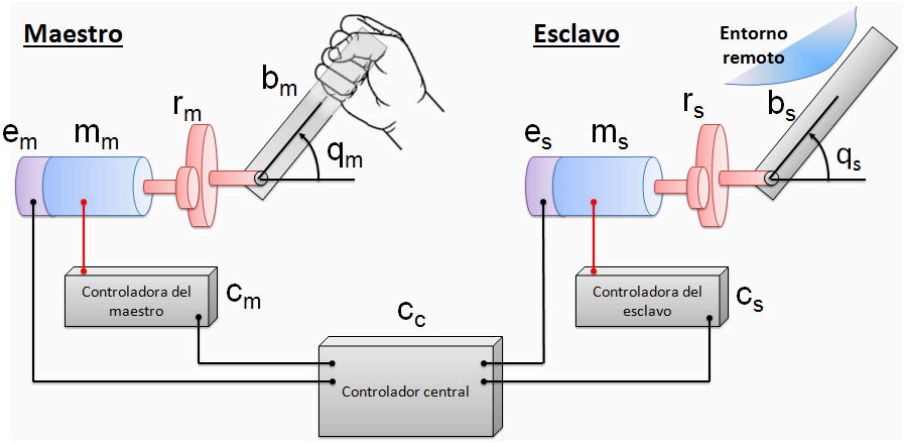


Figura 2: Esquema de la maqueta desarrollada para el control bilateral posición-posición. El subíndice 'm' denota 'maestro', mientras que el subíndice 's' denota 'esclavo'.

4 DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL

El esquema de control posición-posición presentado en la sección anterior se ha dividido en varias partes: el algoritmo de control ejecutado en la placa Arduino, la etapa de filtrado de la acción de control y la amplificación de dicha acción de control.

4.1 ALGORITMO DE CONTROL EJECUTADO EN ARDUINO

En la Tabla 1 se muestra el código del algoritmo de control bilateral posición-posición que se ejecuta cíclicamente en la placa de Arduino MEGA 2560. Dicho código está integrado por cuatro funciones definidas tras la declaración de las variables. Se distinguen las variables enteras que llevan la cuenta de la posición angular del maestro y del esclavo (enc_m_count y enc_s_count respectivamente), las variables que almacenan la diferencia entre la posición deseada y real para el maestro y el esclavo (error_m y error_s resp.) y las acciones de control en tensión a aplicar a los motores que controlan al maestro y al esclavo (u_m y u_s resp.).

Tabla 1: Declaración de variables y funciones principales.

Nº	Código
1	**#include** <avr/interrupt.h>
3	**#define** enc_s_B 2
4	**#define** enc_s_A 4
5	**#define** enc_m_B 3
6	**#define** enc_m_A 5
8	**int** enc_s_count = 0, enc_m_count = 0, error_s, error_m;
9	**double** u_s, u_m;
11	**void setup**(){
	...
18	}
20	**void loop**(){
	…
55	}
57	**void interrupt_s**(){
	…
63	}
65	**void interrupt_m**(){
	…
71	}

La función **setup()** es la función de configuración que se ejecuta al arrancar la tarjeta Arduino o al reiniciarla. Sólo se ejecuta al comienzo.

Tabla 2: Función setup().

Nº	Código
11	**void setup**(){
12	pinMode(enc_s_B, INPUT);
13	pinMode(enc_s_A, INPUT);
14	pinMode(enc_m_B, INPUT);
15	pinMode(enc_m_A, INPUT);
16	attachInterrupt(0,interrupt_s,RISING);
	// la interrupción 0 está asociada a pin 2
17	attachInterrupt(1,interrupt_m,RISING);
	// la interrupción 1 está asociada a pin 3
18	}

Esta rutina configura mediante la función **pinMode()** de Arduino los pines 2, 3, 4 y 5 de la placa como pines de entrada digitales, para leer los canales A y B de los encoders maestro y esclavo. Además, en las líneas 16 y 17 se configuran los pines 2 y 3, asociados a los canales B de los encoders esclavo y maestro respectivamente, como interrupciones. De esta manera, cuando en dichos pines se produzca un flanco de subida debido a un movimiento de los eslabones, se producirá una interrupción y se ejecutará una función asociada para actualizar las

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

variables que almacenan la posición del eslabón que se ha movido.

Una vez ha saltado la interrupción debido al flanco de subida en el canal B causado por el movimiento del eslabón correspondiente, se ejecuta la función asociada a dicha interrupción (**interrupt_s** para el esclavo y **interrupt_m** para el maestro). En dicha función se incrementa o decrementa en una unidad la posición del eslabón dependiendo del estado del canal A cuando se produce el flanco de subida del canal B. Esta función aparece descrita en la Tabla 3 para el esclavo, teniendo la misma forma la función asociada al maestro (pero sustituyendo las variables con subíndice 's' por las variables homólogas con subíndice 'm').

Tabla 3: Función interrupt_s().

Nº	Código
57	**void interrupt_s**(){
58	if (digitalRead(enc_s_A) == LOW) {
59	enc_s_count = enc_s_count - 1;
60	} else {
61	enc_s_count = enc_s_count + 1;
62	}
63	}

Esta función implementa un algoritmo elemental que permite conocer en un encoder de 2 canales en cuadratura hacia dónde ha rotado el eje acoplado al encoder. Si cuando se ha producido un flanco positivo en el canal B, el canal A está a nivel bajo, entonces se debe decrementar en una unidad la variable entera enc_s_count, que lleva la cuenta de la posición del eje del motor esclavo, en pulsos. En caso contrario (si el canal A está a nivel alto), entonces se debe incrementar dicha variable entera. La Figura 3 muestra de forma gráfica este algoritmo.

Por último, la Tabla 4 muestra el contenido de la función **loop**().

Tabla 4: Función loop().

Nº	Código
20	**void loop**(){
21	
22	error_s = enc_m_count - enc_s_count;
23	u_s = error_s/80.0;
24	if(u_s>5){
25	u_s = 5;
26	}
27	if(u_s<-5){
28	u_s = -5;
29	}
30	if(u_s >= 0){
31	analogWrite(6,round(255*u_s/5));
32	analogWrite(7,0);
33	}
34	else{
35	analogWrite(6,0);
36	analogWrite(7,round(255*abs(u_s)/5));
37	}
38	
39	error_m = enc_s_count - enc_m_count;
40	u_m = error_m/80.0;
41	if(u_m>5){
42	u_m = 5;
43	}
44	if(u_m<-5){
45	u_m = -5;
46	}
47	if(u_m >= 0){
48	analogWrite(8,round(255*u_m/5));
49	analogWrite(9,0);
50	}
51	else{
52	analogWrite(8,0);
53	analogWrite(9,round(255*abs(u_m)/5));
54	}
55	}

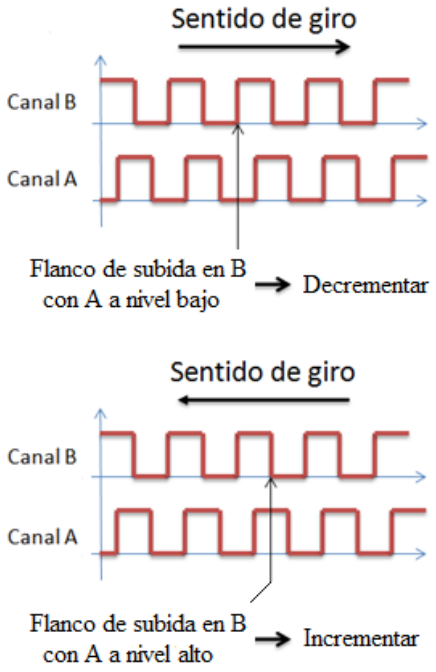


Figura 3: Determinación del sentido de giro mediante los dos canales del encoder.

El código que se escribe dentro de la función loop() de Arduino se ejecuta cíclicamente. En esta función se calcula la acción de control a aplicar a cada motor a partir de la posición tanto del maestro como del esclavo, calculadas mediante las interrupciones mostradas anteriormente.

En la línea 22 se calcula el error de seguimiento para el esclavo (error_s). Dicho error es la posición

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

deseada para el esclavo menos la posición real del esclavo (enc_s_count). En el esquema de control posición-posición, la posición deseada para el esclavo es la posición del maestro (enc_m_count), ya que se busca el seguimiento mutuo.

En la línea 23 se calcula la acción de control u_s a aplicar al motor esclavo para forzarlo a seguir al maestro, de acuerdo con la ley de control (2). Por ensayo y error se ha determinado que como valor adecuado para dicha constante podría tomarse 1/80. La acción de control es saturada a 5 en valor absoluto.

Una vez calculada la acción de control, ésta debe enviarse a los pines de salida de la Arduino como señal analógica. La tarjeta de Arduino no proporciona señales analógicas, luego esta información analógica se debe codificar en el *duty cycle* o ciclo de trabajo de las señales PWM disponibles en la tarjeta (ver Figura 4). Dicha acción de control analógica puede ser reconstruida a partir de la señal PWM empleando un filtro paso bajo, como se describe posteriormente.

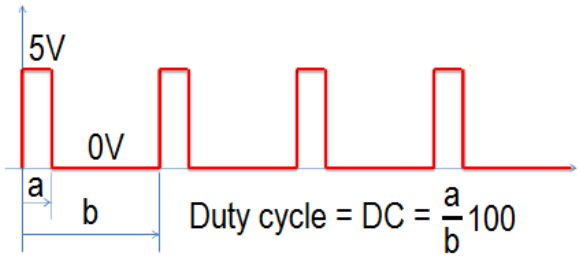


Figura 4: Señales PWM proporcionadas por los pines de Arduino.

De acuerdo a la Figura 4, Arduino sólo genera señales PWM positivas (0V ó 5V) (Figura 5 izquierda). Para conseguir una señal de control negativa, se toma como acción de control la diferencia entre la tensión PWM proporcionada por dos pines de la Arduino (Figura 5 derecha). De esta manera, cuando la acción de control u_s a aplicar al motor esclavo es positiva, por el pin 6 se envía una señal PWM con el *duty cycle* que corresponda y por el pin 7 se envía un cero, luego la acción de control enviada es igual a la señal PWM del pin 6. Cuando la acción u_s calculada es negativa, por el pin 6 se envía un cero y por el pin 7 se envía la señal PWM que corresponda, luego la acción de control es igual a la tensión del pin 7 cambiada de signo (líneas 30-37).

La señal PWM se envía por el pin correspondiente mediante la función analogWrite(PIN,VALOR), donde el parámetro VALOR es un entero entre 0 y 255 que especifica el *duty cycle* deseado: un entero 0 se corresponde con un ciclo de trabajo del 0%, mientras que un entero 255 proporciona un ciclo del 100% (señal continua de 5V), obteniéndose los valores intermedios de forma proporcional.

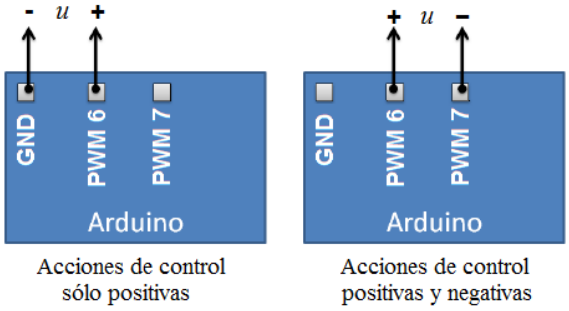


Figura 5: Formas de generar la señal de control *u* desde la Arduino, sin signo y con signo.

La acción de control calculada y almacenada en la variable u_s es directamente el valor de la tensión de salida analógica que se querría tener si Arduino pudiera generar directamente señales analógicas, por eso se ha saturado a 5V en valor absoluto.

Entre las líneas 39 y 54 de la Tabla 4 se realizan las operaciones necesarias para calcular y enviar la acción de control correspondiente para el maestro.

Es importante destacar la necesidad de emplear las interrupciones para contar los cambios de posición de los motores. De forma alternativa, al principio de la función **loop()** y antes de calcular las acciones de control, podrían incluirse sentencias condicionales similares a las de la Tabla 2, de manera que si se detecta un cambio de estado en el canal B del encoder con respecto al ciclo anterior de la ejecución de la función **loop()**, se incremente o decremente el contador de la posición en función del estado del canal A. No obstante, si el eje del motor se mueve lo suficientemente rápido, este método se salta pulsos y el contaje de la posición es incorrecto.

4.2 FILTRADO RC PARA SUAVIZAR LAS SEÑALES DE CONTROL PWM

Una vez se ha calculado y generado la acción de control con Arduino, la potencia de dicha acción debe amplificarse antes de poder aplicarse a los motores del maestro y del esclavo. Previamente a dicha amplificación, no obstante, es conveniente transformar las acciones PWM en señales lo más parecido posible a señales continuas. De esta forma se evita el molesto ruido que se produce al introducir una tensión PWM, con frecuencias elevadas, a un motor DC. Dicha transformación o suavizado se ha implementado mediante un simple filtro paso bajo RC como el de la Figura 6.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

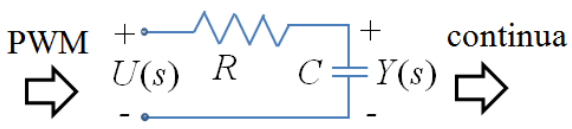


Figura 6: Filtro RC para suavizar las acciones de control PWM.

La función de transferencia de este filtro es:

$$G_F(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{1}{RCs+1} \qquad (3)$$

La elección de los parámetros R y C se ha realizado a través de simulaciones en Simulink, escogiéndose finalmente $R=3.3k\Omega$ y $C=1\mu F$. En la Figura 7 se muestra, en simulación, el resultado de introducir a este filtro una señal PWM como la mostrada en dicha figura. La frecuencia de la PWM es de 490 Hz, como en Arduino. Durante el primer tercio del tiempo de simulación, la entrada es una PWM que se generaría en Arduino a partir de una acción u_s = 1.25, lo cual genera un *duty cycle* del 25% (línea 31 de la Tabla 4). En el segundo tercio de la simulación, la entrada es una PWM que se generaría en Arduino mediante una acción u_s = -3.5, que se corresponde con un *duty cycle* del 70%. Finalmente, en el tercio final la entrada tiene un *duty cycle* del 100%, es decir, es una señal continua. A la derecha en la Figura 7 se muestra la salida del filtro: en cada tramo se logra reconstruir aproximadamente una señal continua con un nivel medio de tensión igual al valor de la variable u_s del código de Arduino que genera la PWM introducida al filtro en cada tramo.

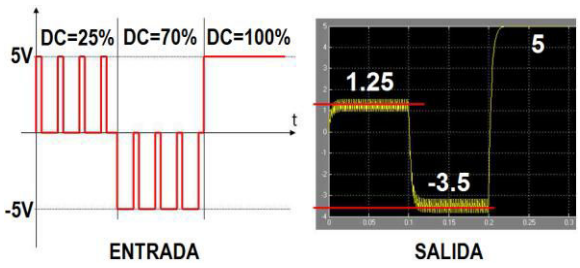


Figura 7: Señal PWM introducida al filtro diseñado y respuesta obtenida. DC = *duty cycle*.

Como puede comprobarse, la señal de salida es aproximadamente continua, salvo que tiene un pequeño rizado acoplado que puede provocar que los motores chirríen ligeramente. En cualquier caso, el comportamiento es mucho mejor que si no se emplea ningún filtro en absoluto. El rizado podría reducirse aún más mediante filtros más sofisticados, pues se ha empleado un sencillo filtro lineal de primer orden.

4.3 AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DE CONTROL EN LAS CONTROLADORAS DE LOS MOTORES

El último paso antes de aplicar la acción de control a los motores es amplificar la potencia de dichas señales de control. Los voltajes de control de salida de los filtros no disponen de la potencia suficiente para mover los motores, ya que la Arduino no puede proporcionar tanta corriente por sus pines. Para solucionar esto, la señal de control se introduce a la controladora de cada motor.

Las ESCON 36/2 de Maxon Motors son servo-controladoras muy versátiles para motores de corriente continua de pequeña potencia y fácilmente configurables mediante el software ESCON Studio. Para este artículo han sido configuradas para funcionar como un simple amplificador, de manera que aplican a los motores una tensión proporcional a la que se obtiene a la salida de los filtros RC. De forma alternativa, estas controladoras se pueden configurar para hacer un control en corriente (par) o en velocidad, aunque se ha preferido realizar un control por tensión (controladoras configuradas en lazo abierto) para tener un mayor control sobre el tipo de regulación realizada en cada motor (es decir, así el lazo de control se cierra puramente mediante la Arduino, no hay bucles de control anidados).

El factor de proporcionalidad escogido para las dos controladoras es la unidad, luego la tensión que aplica cada controladora a cada motor es exactamente la tensión obtenida a la salida de los filtros RC. De esta forma, las controladoras actúan únicamente como amplificación de la potencia: aplican la tensión deseada a los motores y les proporcionan la corriente demandada por éstos.

Una ventaja de las controladoras ESCON 36/2 es que pueden configurarse para admitir como acción de control directamente una señal PWM, de forma que aplican al motor una tensión continua que depende del *duty cycle* de dicha señal PWM. De esta manera, el filtro RC no sería necesario y bastaría conectar directamente Arduino con las controladoras. No obstante, para otras controladoras que no admitan esta posibilidad sí es conveniente incluir dicho filtro.

Finalmente, la Figura 8 resume la secuencia de operaciones a realizar para transformar una acción de control almacenada en una variable de tipo *double* en Arduino en la tensión eléctrica aplicada en los bornes de uno de los motores de corriente continua del sistema.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

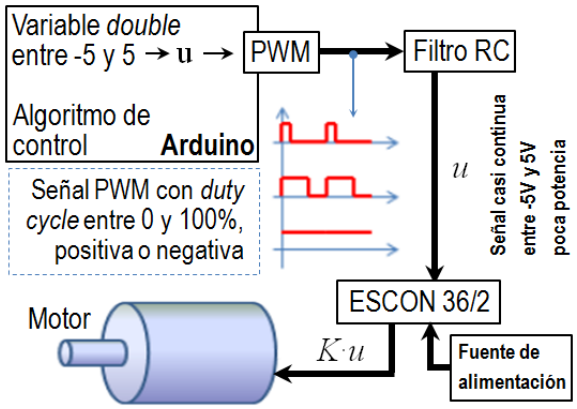


Figura 8: Secuencia de operaciones para transformar una acción de control de tipo *double* almacenada en Arduino en una tensión analógica.

5 FUNCIONAMIENTO DEL ESQUEMA COMPLETO

En este apartado se resume detalladamente el funcionamiento de la maqueta de control completa mostrada de forma esquemática en la Figura 9, que incluye todas las conexiones entre los componentes. Seguidamente se describe el funcionamiento de la maqueta y las relaciones entre sus componentes:

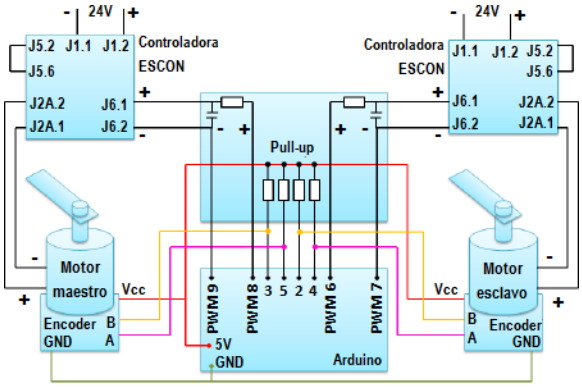


Figura 9: Esquema de control bilateral posición-posición.

1) La posición del eslabón maestro se mide a partir del encoder conectado al motor que lo impulsa, introduciéndose el canal B de dicho encoder por el pin digital 3 de la Arduino (correspondiente a la interrupción 1) y el canal A por el pin digital 5.

2) De forma similar, La posición del eslabón esclavo se mide introduciendo el canal B de su encoder por el pin 2 de la Arduino (interrupción 0) y el canal A por el pin digital número 4.

3) Los encoders van alimentados por la placa Arduino, que proporciona 5V. Dicha tensión también se utiliza para habilitar las señales digitales de los canales A y B de ambos encoders por medio de 4 resistencias pull-up de 3.3kΩ.

4) La placa Arduino ejecuta el sencillo algoritmo de control descrito en la Sección 4.1, que calcula la acción de control para cada motor como el error de seguimiento multiplicado por una constante. A continuación proporciona la tensión de control PWM entre los pines PWM 8 y 9 para el maestro, y entre los pines PWM 6 y 7 para el esclavo.

5) Cada señal de control PWM se pasa por el filtro RC descrito en la Sección 4.2 para transformarlas en señales aproximadamente continuas entre -5 y 5V.

6) Acto seguido, las señales de control casi-continuas se introducen a las controladoras, las cuales aplican a los motores voltajes iguales a las acciones de control. Los motores pueden tomar la corriente necesaria de las controladoras mientras no sobrepasen el límite máximo de corriente de éstas (2A en continuo y 4A de forma transitoria) y de la fuente que las alimenta.

6 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Se ha comprobado mediante experimentos el correcto funcionamiento de la maqueta de control bilateral. Al mover uno de los eslabones, el eslabón maestro y el esclavo se siguen mutuamente con una respuesta rápida. Dado que se ha diseñado todo el sistema de forma simétrica, además, el funcionamiento es el mismo independientemente de qué eslabón se tome como maestro y cuál se considere esclavo. Por otra parte, cuando se está moviendo uno de los eslabones como maestro, puede sentirse en él la inercia del eslabón esclavo como una resistencia adicional, siendo éste uno de los principales problemas del esquema de control bilateral posición-posición: la fuerza transmitida al maestro no es puramente la de interacción del esclavo con el entorno, sino que va contaminada con la fuerza de inercia del esclavo.

A continuación se comparan las trayectorias del maestro y del esclavo a lo largo del tiempo para unos movimientos de prueba realizados sobre el maestro. En la Figura 10 se muestra la posición del maestro en grados (en rojo) a lo largo de una trayectoria y su seguimiento por el esclavo (en azul). En la Figura 11 se muestra otro experimento de seguimiento incluyendo la colisión del esclavo con un elemento de su entorno que le impide continuar siguiendo al maestro. En este caso se han intercambiado los papeles del maestro y el esclavo: en color azul se muestra la posición angular del maestro, mostrándose en rojo la del esclavo. Estas gráficas se han obtenido midiendo los canales A y B de ambos encoders con una tarjeta dspace1103, lo que permite visualizar el contaje de los encoders y la posición real de maestro y esclavo en una gráfica en el computador.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

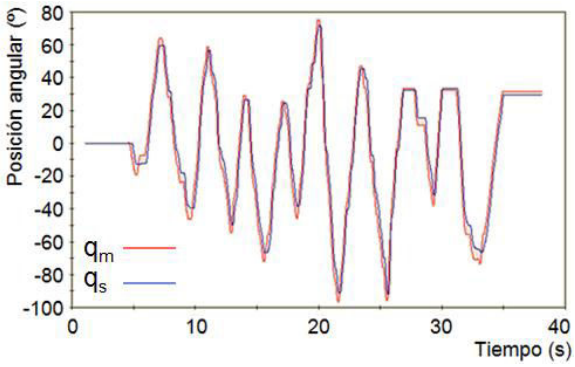


Figura 10: Ejemplo de seguimiento del maestro (rojo) por el esclavo (azul).

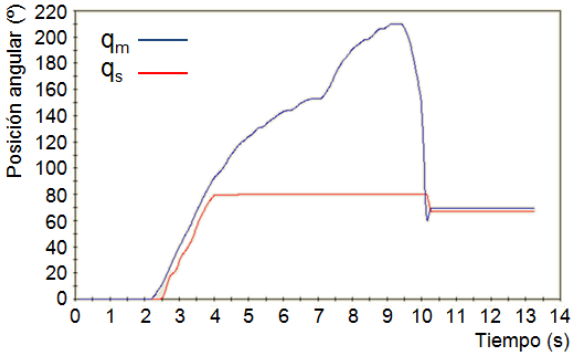


Figura 11: Choque del esclavo (rojo) con un obstáculo de su entorno.

7 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la implementación de una maqueta docente de control bilateral para la realización de experimentos con esquemas de control en Telerrobótica. Dicha maqueta consta de un único grado de libertad y se ha construido empleando equipos de bajo coste. En concreto, el clásico esquema de control bilateral posición-posición se ha implementado en una tarjeta Arduino MEGA 2560. Se ha indicado cómo implementar el mencionado algoritmo de control en código de Arduino, explicando cómo proceder a la lectura correcta, mediante interrupciones, de los pulsos generados por los encoders al mover los eslabones para evitar que el algoritmo se salte pulsos. También se ha descrito un procedimiento para transformar la acción de control PWM generada por Arduino en una tensión analógica útil con la que poder controlar los motores.

Esta maqueta puede ser empleada por estudiantes de Telerrobótica para estudiar diferentes controladores con los que mejorar tanto el seguimiento mutuo entre maestro y esclavo como la reflexión de esfuerzos del esclavo al maestro. Para ello los estudiantes pueden programar diferentes controladores en código de Arduino, desde el controlador proporcional descrito en este artículo hasta controladores PID discretos.

Por otra parte, el esquema de control implementado en Arduino es un esquema discreto donde el tiempo que transcurre entre la aplicación de dos acciones de control sucesivas es igual al tiempo que tarda la tarjeta en ejecutar la función loop(), que se ve afectado por las interrupciones generadas por los pulsos de los encoders. Por tanto, esta maqueta también puede utilizarse por los alumnos para estudiar sistemas muestreados de control donde el periodo de muestreo no es constante, a diferencia de los sistemas con periodo constante normalmente estudiados en asignaturas de control discreto.

La utilización de Arduino en la realización de proyectos de control permite estudiar fenómenos como el anterior, que son obviados cuando se utilizan otras plataformas en las que la programación del algoritmo de control se realiza a más alto nivel (p.e. mediante diagramas de bloques); plataformas que facilitan la tarea del estudiante pero que también le ocultan algunos problemas prácticos de importancia.

Referencias

[1] http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140

[2] http://www.arduino.cc/es/

[3] http://www.intelitek.com

[4] Siciliano B, Khatib O (Editores). Springer Handbook of Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 1611p. ISBN: 978-3-540-23957-4.

[5] Soriano, A., Marín, L., Juan, R., Cazalilla, J., Valera, A., Vallés, M., & Albertos, P. Plataforma robótica de bajo coste y recursos limitados basada en Arduino y dispositivos móviles. XXXIV Jornadas de Automática. Terrassa, 4-6 de septiembre de 2013.

[6] Valera, A.; Valles, M.; Fernandez, A.; Albertos, P., "Platform for the development of mechatronic practical works based on LEGO Mindstorms NXT robots," *Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE* , vol., no., pp.1224,1229, 8-10 July 2009

[7] Vallvé Navarro, J., & Costa Castelló, R. Automatización de instrumentos musicales: un proyecto integral de ingeniería industrial. XXXIII Jornadas de Automática. Vigo, 5-7 de septiembre de 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ARQUITECTURA ABIERTA DE CONTROL VISUAL DIRECTO SOBRE FPGA

Aiman Alabdo, Gabriel J. García, Jorge Pomares, Fernando Torres
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, San Vicente del Raspeig, CP: 03690
Universidad de Alicante
aiman_alabdo@yahoo.com, {gjgg, jpomares, Fernando.Torres}@ua.es

Resumen

Los sistemas de control visual se han desarrollado tradicionalmente sobre procesadores de propósito general secuenciales. Estos sistemas de control requieren, sin embargo, unidades de proceso que trabajen en paralelo, y permitan así, obtener la información visual de la escena en el instante en que la imagen es capturada. Este artículo describe una propuesta de arquitectura embebida abierta de un controlador visual directo para robots industriales basada en FPGA. A lo largo del artículo, se detallan los distintos componentes del módulo de procesamiento de imágenes para obtener características visuales en cada iteración del bucle de control visual. Para poder utilizar esta arquitectura de control visual con cualquier robot y cualquier cámara sólo habrá que rediseñar dos módulos dependientes del hardware, el resto de la arquitectura se mantiene de manera general.

Palabras Clave: Control visual, FPGA, Arquitectura abierta, Robot manipulador.

1 INTRODUCCIÓN

El control visual de robots [3] se ha convertido en una de las tecnologías más empleadas para llevar a cabo el guiado de robots por visión. Este tipo de control emplea visión artificial en la realimentación del bucle de control para controlar el comportamiento de un robot. Sin embargo, los sistemas de control visual, sobre todo en lo que respecta a uso de visión artificial, requieren de alta capacidad computacional. La adquisición y procesamiento de datos de imágenes en tiempo real es una cuestión crítica en las aplicaciones de control visual. En este sentido, resultan esenciales, por un lado, una alta velocidad de captura de imágenes y, por otro lado, una baja latencia de procesamiento, ya que el sistema de control visual debe tomar decisiones rápidas basadas en la información extraída de una escena. Para cumplir con las restricciones de tiempo real, el desarrollo de sistemas de control visual requiere generalmente un alto coste de hardware, así como software especializado. Esto representa un grave obstáculo para el diseño de sistemas de control visual en tiempo real. El procesamiento de imágenes en tiempo real impone serias exigencias relacionadas con una alta frecuencia de procesamiento de los píxeles, una potencia de computación masiva y paralela, y la utilización de hardware especializado (evitando implementar por software los algoritmos de visión artificial). Los procesadores de propósito general no siempre pueden proporcionar suficiente potencia de cálculo para cumplir con los requisitos de tiempo real debido a su naturaleza secuencial. Gracias a su arquitectura, paralelismo y flexibilidad de configuración, las Field Programmable Gate Array (FPGA) se utilizan cada vez más en el ámbito de la investigación como plataformas de ejecución para el procesamiento de imágenes en tiempo real.

Este artículo presenta una arquitectura embebida abierta de un controlador visual directo para robots industriales basada en FPGA. Esta arquitectura es extensible fácilmente para controlar cualquier robot manipulador multi-articular siempre que sus motores dispongan de encoders incrementales. De esta forma, el sistema será modular y flexible ante posibles cambios que puedan producirse como consecuencia de la incorporación o modificación de los drivers de control, o incluso a cambios de configuración en los sistemas de adquisición de datos y el control de los mismos.

Actualmente es posible encontrar un gran número de controladores para robots que pueden clasificarse en propietarios, híbridos y abiertos. La mayoría de robots propietarios presentan un controlador con una estructura cerrada en la que incluir hardware adicional o nuevas características de los controladores es difícil o imposible. Se habla de arquitecturas híbridas cuando la mayoría de las características, como son las leyes de control implementadas, son cerradas. Sin embargo es posible añadir fácilmente nuevos dispositivos hardware o sensores. Por último, en una arquitectura abierta el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

diseño de la arquitectura puede ser modificado por el usuario. Tanto el hardware como el software de la arquitectura son conocidos por el usuario y puede modificarlos sin dificultad. En este artículo se propone una arquitectura abierta para el control visual de robots. En este sentido, la reprogramabilidad y reconfigurabilidad que proporcionan las FPGAs permiten que el usuario pueda modificar cualquier elemento de la arquitectura (leyes de control, comunicaciones, sensores, etc.). Existen distintos proyectos para la definición de arquitecturas abiertas aplicadas a controladores. Este es el caso de OSACA (Open System Architecture for Control within Automation) creado para definir arquitecturas de control independientes del hardware [10]. En [8] se propone un sistema de control distribuido multi-agente de arquitectura abierta para una máquina de control numérico. Dentro del ámbito de las arquitecturas para el control de robots, cabe destacar los trabajos descritos en [5] en los que se muestran las características a tener en cuenta en el diseño de arquitecturas de control abiertas. Es de destacar trabajos como [7] en los que el uso de FPGAs es propuesto para el diseño de controladores de robots debido a su paralelismo y a la flexibilidad que aportan. Así, es posible encontrar arquitecturas para el control de robots que integran FPGAs en algún componente de su diseño [12]. En [15] se describe una arquitectura para el control de robots que es extensible fácilmente a cualquier robot y en la que parte de los controladores es implementado directamente en una FPGA. En comparación con estos desarrollos previos, en el presente artículo se muestran los distintos componentes de una arquitectura abierta diseñada y optimizada para el control visual de robots.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En el Apartado 2 se muestran las principales características de los sistemas de control visual directo que podrán ejecutarse haciendo uso de la arquitectura propuesta. En el Apartado 3 se detalla la arquitectura hardware y software haciendo énfasis en los aspectos relacionados con la implementación de los algoritmos de visión artificial. Por último en los Apartados 4 y 5 se describen los resultados y conclusiones que se pueden extraer.

2 CONTROL VISUAL DIRECTO

El sistema que se propone permite modificar fácilmente el controlador visual utilizado. En este artículo se prueba la arquitectura con un controlador visual dinámico. Sin embargo, la arquitectura permite modificar el módulo del controlador sin afectar en nada al resto de módulos del sistema. En el control visual directo se calcula y envía los pares y fuerzas articulares que deben guiar al robot hacia la posición requerida. El resultado es un control mucho más rápido y preciso que si se utiliza un control visual indirecto clásico. El principal inconveniente de estos controladores es que se debe trabajar directamente con los parámetros dinámicos no lineales del sistema robótico. Cuando se diseña un robot, se conocen de forma precisa sus parámetros dinámicos (masas, localización del centro de gravedad, términos de inercia y parámetros de fricción). Sin embargo, estos parámetros son desconocidos en la mayoría de robots industriales de carácter comercial. En ausencia de fricción u otras perturbaciones, la dinámica de un robot manipulador puede escribirse como [13]:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \tau \qquad (1)$$

donde $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ es la configuración articular, $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ representa las velocidades articulares y $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ las aceleraciones articulares, $\tau \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ es el vector de fuerzas y pares articulares aplicados, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ es la matriz de inercia (simétrica y definida positiva), $\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ es el vector de pares y fuerzas de Coriolis y $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ es el vector de fuerzas y pares gravitacionales.

El control visual descrito en [6] es un control visual basado en imagen, dado que la tarea del robot se especifica en el plano imagen en términos de los valores de las características de la imagen correspondientes a las posiciones relativas entre el robot y el objeto. La aproximación que se sigue en [6] viene motivada por la filosofía de control de Jacobiana traspuesta introducido en [14]. La ley de control propuesta viene dada por:

$$\tau = \mathbf{J}(\mathbf{q},\mathbf{s},\mathbf{Z})^{\mathrm{T}} K_{\mathrm{p}}\mathbf{e} - K_{\mathrm{v}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \qquad (2)$$

donde $K_{\mathrm{p}} \in \mathbb{R}^{2\mathrm{M}\times 2\mathrm{M}}$ y $K_{\mathrm{v}} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ son las constantes proporcional y derivativa respectivamente. Estas constantes son matrices simétricas definidas positivas elegidas por el diseñador del controlador, M es el número de características del objeto en la imagen y *n* es el número de articulaciones del robot.

Dentro del primer término de (2), $\mathbf{e} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_{\mathrm{d}})$ es el error en imagen, siendo $\mathbf{s}_{\mathrm{d}}$ el conjunto de características de la imagen en la posición deseada del robot respecto al objeto y $\mathbf{s}$ el conjunto de las características de la imagen en la iteración actual. $\mathbf{J}(\mathbf{q},\mathbf{s},\mathbf{Z})^{\mathrm{T}}$ se define como la traspuesta de la matriz Jacobiana, que en [6] se define como:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\mathbf{J}(\mathbf{q},\mathbf{s},\mathbf{Z}) = \mathbf{L}_s(\mathbf{s},\mathbf{Z}) \cdot \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2M \times n} \quad (3)$$

donde $\mathbf{L}_s(\mathbf{s},\mathbf{Z}) \in \mathbb{R}^{2M \times 6}$ es la Jacobiana de la imagen para las características elegidas [4] y depende de la posición actual de las articulaciones del robot, ya que se emplea una configuración eye-in-hand [3]; y $\mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ es el Jacobiano del robot en su extremo [11] (también se calcula a partir de la posición actual de las articulaciones):

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

El segundo término de (2) ($-K_v\dot{\mathbf{q}}$) se corresponde con la acción derivativa y requiere que se disponga en cada iteración de las velocidades de las articulaciones del robot, $\dot{\mathbf{q}}$. Mientras que el término $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ es el término de pares gravitacionales del modelo dinámico del robot. Será, por tanto, necesario su cálculo para obtener los pares y fuerzas a aplicar al robot para minimizar el error en imagen. Este término de la dinámica del robot depende únicamente de la posición actual de las articulaciones, $\mathbf{q}$.

Para el cálculo de la ley de control descrita en (2) se necesita una serie de datos en cada iteración. En el siguiente apartado se describe la arquitectura propuesta para proporcionar esta información al sistema en tiempo real.

3 ARQUITECTURA ABIERTA PARA CONTROL VISUAL SOBRE FPGA

La arquitectura que se propone en este artículo permite realizar un guiado de un robot manipulador mediante control visual directo. El principal objetivo de la propuesta es obtener un esquema general implementado sobre una FPGA que permita el control de cualquier brazo robótico mediante el uso de cualquier tipo de cámara. Sin embargo, en las pruebas realizadas para la validación del esquema propuesto, se ha utilizado una cámara de tipo CameraLink y un robot manipulador de 3 grados de libertad (gdl) denominado COOPER [9]. A continuación se detalla por un lado la arquitectura hardware, donde se definirán claramente los componentes de la arquitectura generalista y los elementos particulares utilizados en la validación de la arquitectura propuesta. Por otro lado, se describe la arquitectura software propuesta, remarcando los módulos dependientes del hardware que deben ser desarrollados para el uso del sistema en el guiado de otros tipos de robots y con el uso de otros tipos de cámaras.

3.1 ARQUITECTURA HARDWARE

La arquitectura hardware propuesta puede verse en la Figura 1. Está compuesta por cinco partes principales: un robot industrial, una cámara rápida montada en el extremo del robot, un terminal de interfaz (PC), amplificadores de potencia para controlar los motores del robot y una placa de FPGA en la que se implementan los algoritmos de visión y control visual. Además, es necesario disponer de adaptadores de tensión entre la FPGA y los distintos componentes que se conectan con ella.

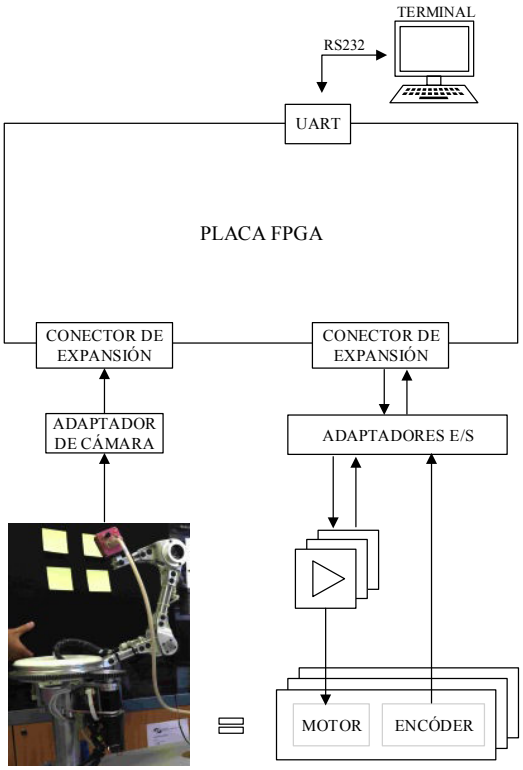


Figura 1: Arquitectura hardware

Para implementar el diseño propuesto se ha elegido la placa KC705 Eval Board que contiene una FPGA Kintex7 de Xilinx. Esta placa dispone de dos conectores FMC, que facilitan el acceso a las entradas/salidas de la FPGA, y un puerto serie UART por el que se comunica la FPGA con el PC terminal. La cámara utilizada en las pruebas de validación de la arquitectura es una MV-D752-CL CMOS CameraLink de Photonfocus. Es una cámara monocroma capaz de capturar imágenes a una velocidad de hasta 340 imágenes por segundo a máxima resolución de 752x582 píxeles. El robot empleado, denominado COOPER [9], está compuesto por tres articulaciones de tipo RRR diseñado y construido íntegramente por el grupo de investigación AUROVA de la Universidad de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Alicante. Este robot incorpora tres motores Maxon acoplados a cada una de las articulaciones mediante un sistema reductor planetario. Además, la sensorización de la estructura robótica integra encóders relativos al eje de los motores y tres sensores inductivos (en cada una de las articulaciones). En cuanto al control de los motores se han seleccionado unos servoamplificadores de Maxon, modelo ADS 50/5 para control de motores de corriente continua de hasta 250W. Estos servoamplificadores toman como referencia una tensión analógica de entre 10V y -10V, generada por un conversor digital analógico DAC situado entre la FPGA y los amplificadores.

Mediante esta arquitectura hardware se pretende evaluar el comportamiento de la arquitectura software abierta desarrollada sobre la FPGA. En el siguiente apartado se describirá esta arquitectura software.

3.2 ARQUITECTURA SOFTWARE

Un sistema de control visual requiere de un subsistema de visión muy sofisticado con el fin de conseguir un controlador robusto con la capacidad de procesar las imágenes en tiempo real a velocidades de fotograma relativamente altas. Si dicho sistema no satisface suficiente potencia computacional y alta frecuencia de transferencia de datos la ejecución del algoritmo de control visual se ve comprometida. Como resultado, los robots con baja frecuencia en el bucle de control reaccionarían de forma lenta y podrían fallar en la realización de tareas que tienen estrictos requisitos de tiempo.

Para resolver el problema de la eficiencia y el rendimiento del sistema de control visual se propone una arquitectura abierta de software para implementar sobre FPGAs. La Figura 2 muestra el esquema completo del software implementado. Para obtener mayor flexibilidad en el sistema se ha dividido el diseño del software en sub-procesos y se ha implementado la funcionalidad de cada sub-proceso en un módulo separado. Los módulos están sincronizados y se ejecutan de forma paralela aprovechando las ventajas de la arquitectura de las FPGAs.

Para que esta arquitectura sea abierta o genérica se han separado los módulos que dependen del hardware empleado en la práctica de los módulos generales. Como se puede observar en la Figura 2, los módulos particulares son:

a) *Frame Grabber*: Este módulo se encarga de leer los datos de las imágenes de la cámara y por eso depende del protocolo que utiliza la cámara que se emplea en el sistema de control visual, que puede ser CameraLink, GigE Ethernet, etc.

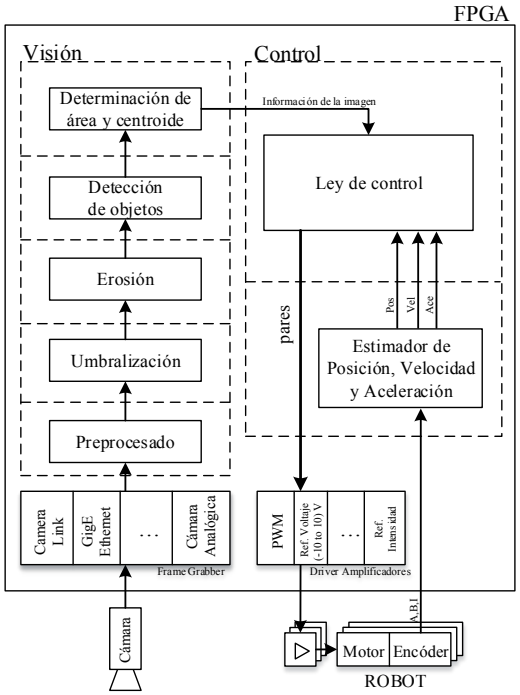


Figura 2: Arquitectura software

b) Driver amplificadores: Este módulo es responsable de convertir los pares resultantes de la etapa de control en señales adecuadas para controlar los amplificadores de potencia de los motores del robot. Por tanto, dependen del tipo de señal de entrada que toman como referencia dichos amplificadores. La mayoría de amplificadores de potencia para motores DC usan como entrada una señal PWM debido a su sencillez, pero también existen otros modelos de amplificadores que toman como referencia una señal analógica que puede ser voltaje o corriente.

El resto de módulos son genéricos e independientes del hardware usado, y se han dividido según su funcionalidad en dos partes: visión y control. En este artículo se describe el módulo de visión, detallando las propuestas para conseguir un bloque funcional abierto capaz de proporcionar a los sistemas de control visual la información relevante en el plano imagen.

La parte de visión consiste en una serie de cinco etapas que se dedica a procesar las imágenes recibidas del *frame grabber* para extraer la información visual deseada. Una de las principales contribuciones de este trabajo es la implementación de los algoritmos de visión en un cauce segmentado de modo que se procesan los píxeles de la imagen una vez recibidos sin la necesidad de guardar la imagen en un buffer y esperar hasta recibir toda la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

imagen para empezar a analizarla. De esta forma, se reduce la latencia de todo el sistema y se ahorra una cantidad considerable de los recursos de almacenamiento al mismo tiempo que se reduce el tráfico de datos. La función de cada etapa (ver Figura 2) es la siguiente:

1. Preprocesado: En esta etapa se aplican operaciones preliminares para lograr un formato único de imagen independiente de la cámara utilizada, como la conversión de RGB a escala de gris, redimensionado de la imagen, filtrado de ruido, etc.

2. Umbralización: Es la función más simple en el procesamiento de imagen. Se aplica a imágenes monocromas y el resultado es una imagen binaria que tiene toda la información esencial del patrón. Esta función viene definida como:

$$g(x,y)=\begin{cases} 255, & f(x,y)\geq U \\ 0, & f(x,y)<U \end{cases} \qquad (5)$$

donde U es el valor del umbral.

3. Erosión: Es una operación morfológica cuyo resultado elimina los píxeles situados en los bordes de los objetos. Su principal utilidad es eliminar el ruido. Esta etapa es opcional y se puede saltar si se ha aplicado algún filtro para reducir el ruido en la primera etapa de preprocesado.

4. Detección de objetos: Es la etapa más importante en el diseño, ya que su implementación consume la mayor parte de los recursos hardware de la FPGA. La función de este módulo es detectar los píxeles conectados que forman un objeto en la imagen y asignarles una etiqueta. Hay varios algoritmos para detectar objetos [1], como Run-Length coding, Chain Coding, Single Pass and Multiple Pass, etc. Para optimizar la implementación sobre FPGA se ha elegido el algoritmo Two-Pass Algorithm. Este algoritmo realiza el etiquetado de la imagen en dos fases. En la primera fase se procesan los píxeles recibidos del módulo de Umbralización y se les asigna etiquetas provisionales guardando esta información en la memoria RAM. Al mismo tiempo, se establece una tabla LUT (Look-Up Table) que determina las etiquetas que pertenecen a un mismo objeto. Esta tabla (denominada tabla de equivalentes LUT) se utiliza en la segunda fase para interpretar los datos de la imagen etiquetada provisionalmente y almacenada en la memoria RAM y unir todas las etiquetas de dicho objeto. La Figura 3 muestra el funcionamiento de cada fase del algoritmo mencionado. La idea básica de la primera fase es: si el píxel recibido no es cero (fondo) se examinan los píxeles vecinos de arriba "A", "B" y "C" (en la línea anterior) y el píxel a la izquierda "D" (el píxel anterior). Si todos son ceros se asigna una nueva etiqueta al píxel actual, si no se le asigna la etiqueta menor (distinta de cero) de los píxeles vecinos "A", "B", "C" y "D". Después de procesar toda la imagen y guardarla en el buffer, se guarda una copia de la tabla de equivalentes y así la fase 1 puede procesar una nueva imagen mientras se procesa la imagen anterior en la fase 2 (en el cauce segmentado). La tarea de la fase 2 es bastante sencilla: leer los píxeles almacenados en la memoria RAM (Frame Buffer) e interpretarlos según la tabla de equivalentes LUT.

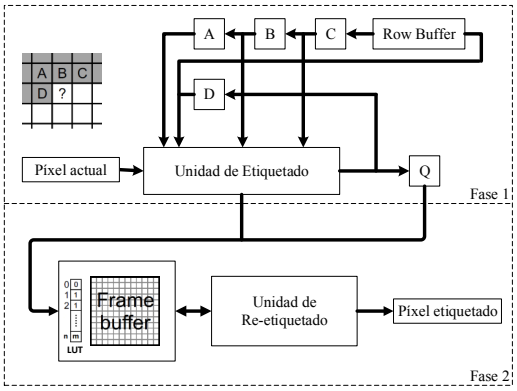


Figura 3: Algoritmo de detección de objetos.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo práctico del algoritmo descrito para la detección de objetos.

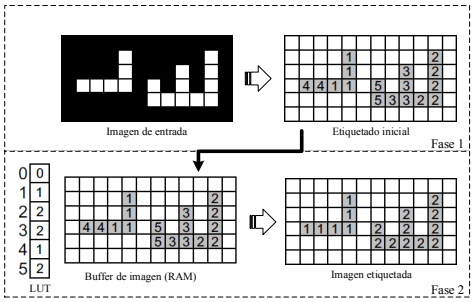


Figura 4: Ejemplo práctico del algoritmo de detección de objetos.

5. Área y determinación del centroide: El objetivo principal de toda la parte de visión de la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

arquitectura propuesta es determinar los centros de gravedad en el plano imagen de los objetos detectados y etiquetados en la etapa anterior. Existen dos aproximaciones para calcular las coordenadas del centro de un objeto en una imagen [2]:

- *Bounding Box*: se estima el centro de un objeto buscando las coordenadas XY de sus píxeles mínimas y máximas. Se define como:

$$x_c = \frac{max_Xpos + min_Xpos}{2} \quad (6)$$

$$y_c = \frac{max_Ypos + min_Ypos}{2} \quad (7)$$

- *Center-of-Mass*: se estiman los centros de gravedad teniendo en cuenta todos los pixeles que forman el objeto. La implementación de este algoritmo requiere mucho más recursos de hardware y capacidad computacional que la que requiere el algoritmo de Bounding Box.

$$x_c = \frac{\sum_i x_{pos_i}}{\text{Área del objeto}} \quad (8)$$

$$y_c = \frac{\sum_i y_{pos_i}}{\text{Área del objeto}} \quad (9)$$

donde el área de un objeto viene definida como el número de píxeles que lo forman, x_{pos_i} es la posición en el eje X del plano imagen de cada píxel del objeto e y_{pos_i} es la posición en el eje Y del plano imagen de cada píxel del objeto.

En la arquitectura propuesta en este artículo se han implementado las dos aproximaciones, dejando así como un parámetro opcional para el usuario la elección del algoritmo utilizado para la determinación del centroide. La aproximación del centro de gravedad consume más hardware para su implementación en la FPGA pero consigue más resolución en la calculación de los centros mientras la de Bounding Box requiere bastante menos hardware pero los resultados se afectan con el menor ruido que pueda sufrir la imagen [2].

4 RESULTADOS

Para validar el diseño propuesto en este artículo se han realizado experimentos utilizando la placa KC705 EVAL BOARD de Xilinx que contiene la FPGA Kintex7 y la MV-D752-CL CMOS CameraLink de Photonfocus. La Figura 5 muestra la arquitectura hardware del sistema empleado para la validación del módulo de visión.

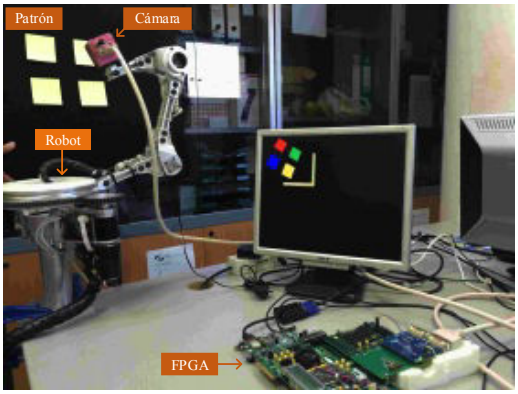


Figura 5: Elementos utilizados para las pruebas.

En la Figura 6 se muestra la segmentación de los distintos algoritmos descritos en la sección anterior. Como puede observarse, estos algoritmos se ejecutan en el cauce segmentado de forma paralela, una de las ventajas que ofrece la implementación de algoritmos sobre dispositivos FPGA. En la Figura 6 se muestra también la latencia requerida en cada etapa.

Los módulos de visión están sincronizados con el reloj de la cámara. La cámara utilizada envía los datos de la imagen a una frecuencia de 80 MHz, enviando dos pixeles a la vez en cada ciclo de reloj. Se ha configurado la cámara para capturar imágenes a máxima resolución (752x582 pixeles) y con velocidad de fotograma de 340 imágenes por segundo, por lo que el periodo de captura de una imagen entera es de 2.9 ms. El tiempo de exposición depende de las condiciones de iluminación y el material de la superficie de la escena, en los experimentos se ha hecho uso de un patrón de papel de color amarillo con fondo de tela de color negro. Con menos luz de la utilizada para este experimento, el tiempo de exposición subiría. También un material plástico o con brillo provocaría un aumento en este tiempo de exposición. El umbral utilizado en la fase de umbralización para este experimento ha sido 75. Este umbral es ajustable con un encóder mecánico integrado en la placa de la FPGA. En trabajos futuros se pretende diseñar un algoritmo de selección de umbral dinámico. De la Figura 6 se observa que el tiempo de exposición es de 0.1 ms y luego leer la imagen completa tarda 2.8 ms. En la etapa de pre-procesamiento se ha cambiado el tamaño de la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

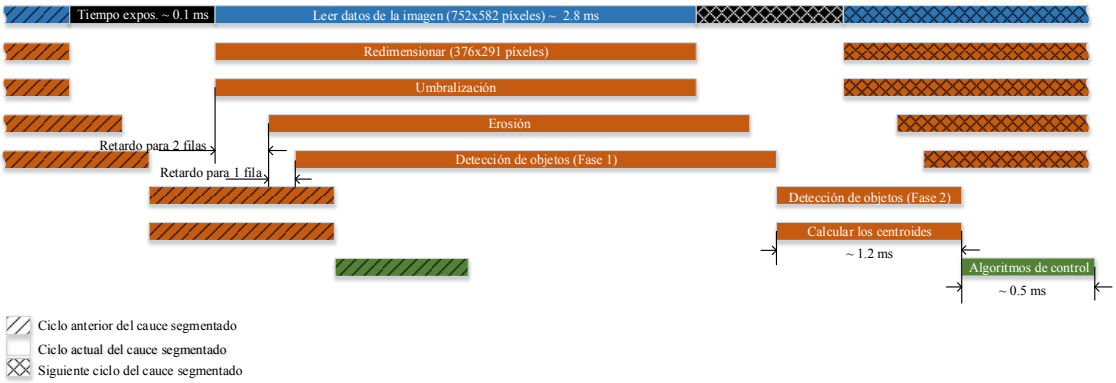


Figura 6: Cauce segmentado del módulo de visión.

imagen a la mitad por dos motivos: el primero es conseguir un píxel en cada ciclo de reloj y pasarlo al módulo siguiente, y el otro es reducir el ruido en la imagen. Esta reducción de la resolución no implica una reducción de los tiempos de ejecución. Sin embargo, reduce significativamente el ruido en la imagen, ya que actúa como un filtro de media. Además, se reduce la memoria necesaria para almacenar la imagen. Se observa también que las etapas de pre-procesamiento y umbralización se ejecutan en el mismo instante en que reciben los píxeles, mientras que la etapa de erosión tiene una latencia equivalente al tiempo de envío de dos líneas de la imagen.

Esto es debido a la naturaleza de esta función morfológica, que necesita comprobar los píxeles vecinos del píxel actual. Lo mismo ocurre en la primera fase de la detección de objetos, donde la latencia es de una línea. Mientras, la segunda fase de esta etapa empieza una vez terminada la fase 1, y su latencia se produce por el tiempo de transferencia de datos entre la FPGA y la memoria. En los experimentos realizados esta latencia es de 1.2 ms utilizando la memoria interna (RAM Blocks) de la FPGA y el reloj de la placa 200MHz.

La última etapa de visión calcula los centros de los objetos en paralelo con la fase 2 de la detección de objetos donde se ha empleado el algoritmo de centro de gravedad teniendo en cuenta que nuestra FPGA dispone de una cantidad bastante grande de recursos hardware. Una vez obtenidos los centros de los objetos se pasan a la parte de control para tomar las decisiones adecuadas y mover el robot de manera que siga el patrón.

En la Figura 7 se ha representado la imagen original, así como el resultado después de la fase de umbralización y de etiquetado. También se muestra el interfaz del terminal que obtiene la posición de las características visuales en el plano imagen a través del puerto serie conectado a la FPGA.

5 CONCLUSIONES

El sistema de visión de un sistema de control visual es el encargado de proporcionar la información para el cálculo de la acción de control. En este artículo se ha descrito una arquitectura abierta que, embebida sobre una FPGA, sea capaz de proporcionar esta información visual a mucha más velocidad de la proporcionada por un sistema desarrollado sobre un procesador de propósito general como un ordenador. Para ello, se ha propuesto un cauce segmentado que permite obtener en paralelo el centroide de los objetos detectados en la imagen. El desarrollo de este módulo de visión y su validación con los distintos experimentos constituyen la primera fase del trabajo para obtener una arquitectura que permita fácilmente desarrollar nuevos esquemas de control visual embebidos en una FPGA. En estos momentos estamos desarrollando el módulo de control que se realimentará con la información visual proporcionada por el módulo de visión presentado en este artículo.

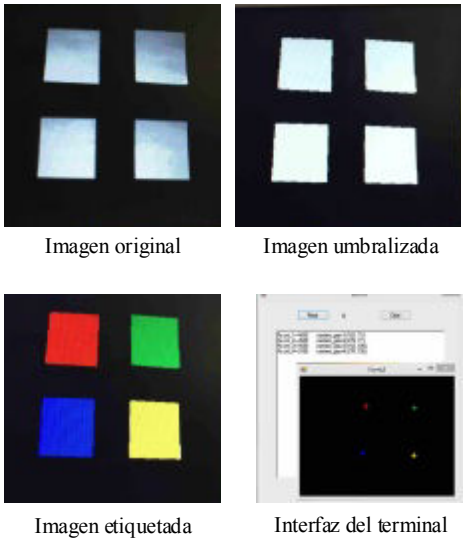


Imagen original | Imagen umbralizada

Imagen etiquetada | Interfaz del terminal

Figura 7: Imagen en su paso por el cauce segmentado propuesto.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y los fondos Europeos FEDER (DPI2012-32390), la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2013/085) y la Universidad de Alicante (GRE12-17).

Referencias

[1] Bailey, D.G. (2011) "Design for Embedded Image Processing on FPGAs*"*, John Wiley & Sons: Singapore, Singapore, 2011.

[2] Bochem, A.; Kent, K.B.; Herpers, R., (2011) "FPGA based real-time object detection approach with validation of precision and performance"*, 22nd IEEE International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP)*, vol. 9, nº 15, pp. 24-27.

[3] Chaumette, F. y S.A. Hutchinson, (2006) "Visual servo control. I. Basic approaches", *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, nº 4, pp. 82-90.

[4] Hashimoto, H., T. Kubota, M. Sato y F. Harashima, (1992) "Visual control of robotic manipulator based on neural networks", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 39, nº 6, pp. 490-496.

[5] Hassan, S., Anwer, N., Khattak, Z., & Yoon, J. (2010). Open architecture dynamic manipulator design philosophy (DMD). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *26*(2), 156–161. doi:10.1016/j.rcim.2009.07.006

[6] Kelly, R., J. Favela, J.M. Ibarra y D. Bassi, (2000) "Asymptotically stable visual servoing of manipulators via neural networks", *Journal of Robotic Systems*, vol. 17, nº 12, pp. 659-669.

[7] Lalpuriya, K., Prakash, N. R., & Rastogi, N. (2013). FPGA based control system for Robotic Applications, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(6), 2864–2867.

[8] Morales-Velazquez, L., de Jesus Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R. A., Herrera-Ruiz, G., Cabal-Yepez, E., 2010. Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. Journal of Systems Architecture 56, 407–418.

[9] Perea, I., García, G.J., Jara, C.A., Pomares, J., Candelas, F.A., Torres, F., (2011) "COOPER (COupled OPEration Robot): control de una estructura articular RRR acoplada a un manipulador", Actas de las XXXII Jornadas de Automática, Sevilla.

[10] Pritschow G. Automation technology—on the way to an open system architecture. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 1990;7(1/ 2):103–11.

[11] Sciavicco, L., B. Siciliano y B. Sciavicco, (2000) "Modelling and Control of Robot Manipulators", p. 402, Springer-Verlag, London, United Kingdom.

[12] Shao, X., & Sun, D. (2007). Development of a New Robot Controller Architecture with FPGA-Based IC Design for Improved High-speed Performance, 3(4), 312–321.

[13] Spong, M.W., (1989) "Robot Dynamics and Control", p. 336, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

[14] Takegaki, M. y S. Arimoto, (1981) "A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators", *J. of Dyn. Syst., Meas., and Control*, vol. 103, nº 2, pp. 119-125.

[15] Zhang, L., Slaets, P., & Bruyninckx, H. (2012). An open embedded hardware and software architecture applied to industrial robot control. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1822–1828.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

PROTOTIPO DE ROBOT DE SERVICIO PARA GUIADO DE PERSONAS POR VISIÓN

Abel Martínez, Houcine Hassan, Carlos Domínguez, Pedro López
abmarmar@etsid.upv.es, {husein, carlosd, plopez}@disca.upv.es
DISCA - Universitat Politècnica de València

Resumen

En el presente artículo se presenta un prototipo de robot de servicio para trabajar en entornos hospitalarios. En concreto, el robot es capaz de reconocer a los pacientes mediante reconocimiento facial, para posteriormente acompañarlos a la consulta donde van a recibir el tratamiento. El reconocimiento facial se consigue con la técnica PCA o Eigenfaces. El sistema dispone de un generador de mapas que registra los obstáculos presentes en el entorno para realizar el guiado.

Palabras clave: Robots de servicio, visión, reconocimiento facial, guiado.

1. INTRODUCCIÓN

Un robot de servicio es todo aquel robot cuya función es la de realizar servicios para ayudar a personas u otros robots [2]. Quedan excluidos por tanto los robots diseñados para trabajar en producción. Dentro del amplio campo de los robots de servicio, han aparecido en los últimos años diferentes robots con la misión de realizar servicios para las personas [3]. Uno de los primeros robots móviles que consiguió entrar en el mercado doméstico como electrodoméstico fue el robot aspirador Roomba, que empezó a comercializar la compañía iRobot en 2002 [4][6]. Otro ejemplo de robot de servicio es el Big-Dog [11], desarrollado por Boston Dinamics y DARPA en 2008, que es capaz de transportar una carga de 150kg o avanzar por pendientes de hasta 35° de inclinación. Por otro lado, en el sector de la medicina están surgiendo avances en los últimos años[1], como por ejemplo el robot de intervenciones quirúrgicas Da Vinci. Otros robots se utilizan en los hospitales para transportar materiales tales como medicamentos. También existen exoesqueletos destinados a la recuperación de personas con lesiones, o para ayudar a caminar a personas mayores o con lesiones permanentes.

El cuidado de las personas mayores es uno de los campos más investigados en robótica en los últimos años, más todavía cuando el envejecimiento de la población española es un hecho notable [9]. Por otra parte, las previsiones de inversión de la Unión Europea en este tipo de robots nos confirman que el empleo de robots de servicio es una tendencia al alza que resulta interesante investigar. Es por estos motivos que en este artículo se presenta una prueba de concepto de un robot de servicio para aplicaciones hospitalarias. Los potenciales usuarios de la aplicación son personas mayores que visitan las consultas externas de un centro hospitalario. La aplicación que se desea evaluar es la de acompañamiento de personas mayores que normalmente se desorientan. Estas personas ya tienen cita, y el sistema sabe a qué consulta deben acudir y en qué momento. Mediante la detección del paciente y su posterior reconocimiento por visión artificial, el robot consulta la base de datos donde se hallan los datos de localización de la consulta de destino.

El presente artículo se organiza como sigue. En la sección 2 se describe la aplicación y en la sección 3 se presenta la plataforma del robot. En la sección 4 se introducen las modificaciones realizadas a la plataforma original. Las secciones 5 y 6 presentan las pruebas y algunas conclusiones respectivamente.

2. APLICACIÓN

La Figura 1 muestra una imagen del prototipo del robot.

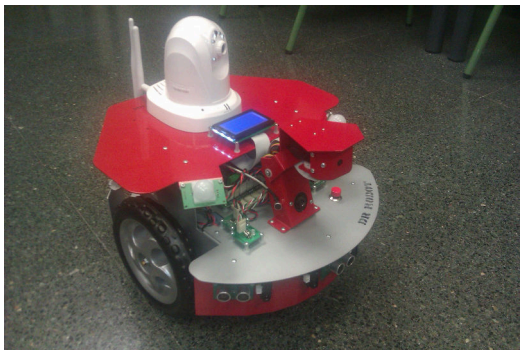


Figura 1: Robot X-80 Pro

La aplicación cuenta con una interfaz de usuario con la que se puede ver dónde se encuentra el ro-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

bot o qué función está desempeñando. También es posible enviar nuevas órdenes al robot, así como detenerlo y manejarlo manualmente.

Una de las tareas que se puede ordenar al robot es la de esperar a los pacientes citados en la entrada, reconocerlos visualmente a su llegada, acercarse a ellos e identificar cúal es su función en el hospital, invitarles a que le sigan y guiarles hasta su consulta comprobando que no pierde a sus asistidos. Para realizar la función anterior en un entorno semiestructurado, con personas y obstáculos móviles, debe mantener un mapa del espacio de navegación e implementar comportamientos de evitación de colisiones y búsqueda de caminos. La Figura 2 muestra al robot acompañando a un usuario.

Figura 2: Robot acompañando a usuario.

Aunque el enfoque de la aplicación consiste en que el robot acompañe a pacientes en entornos hospitalarios, se podría adaptar el robot para, por ejemplo, atención al público en ferias o recepción de clientes en oficinas.

3. PLATAFORMA DEL ROBOT

El robot elegido para montar el prototipo es la plataforma robótica X80Pro del fabricante Dr. Robot. Dicho robot cuenta con múltiples sensores de rango que le permiten conocer los obstáculos más cercanos a él. Tiene dos tipos de sensores de rango, 6 sensores de ultrasonidos que pueden medir hasta 3 metros de distancia y 7 sensores de infrarrojos con un alcance de 80 centímetros. También cuenta con 2 sensores piroeléctricos que detectan la presencia de personas. El robot dispone, además, de dos codificadores rotatorios digitales de 1.200 pulsos por revolución acoplados a las ruedas. Cuenta también con diferentes sensores de voltaje e intensidad, inclinómetros, etc. Esta plataforma podría no ser la más indicada para su uso en ambientes hospitalarios, debido a sus dimensiones y aspecto, pero ha permitido validar la aplicación en sí, a la par que comprobar los componentes software que se requiere combinar en la aplicación.

El movimiento del robot se consigue gracias a 2 motores de corriente continua de 12V que actúan directamente sobre 2 ruedas de 17.8 cm. La plataforma robótica dispone de una cámara colocada en el extremo de un brazo robótico, lo que le permite inclinarse vertical y horizontalmente.

El robot dispone de diferentes módulos para interactuar con el usuario: tiene micrófono y altavoz para grabar y reproducir audio continuamente. También tiene una pantalla LCD monocromo de 128 x 64 píxeles. Por último, el usuario puede enviar señales al robot utilizando un mando a distancia.

El robot utiliza la Arquitectura de Computación Distribuida Dr. Robot. En esta configuración, la computación se realiza fuera del robot. Esto significa que tanto los actuadores (motores y servomotores) como los sensores (de rango, de inclinación, codificadores rotatorios, etc.) están controlados por un procesador digital de señal (DSP) que se encarga de sus acciones de control y lectura de sus valores, respectivamente. Por otra parte, la computación de alto nivel se lleva a cabo en el PC o servidor que controla el robot. La comunicación entre el PC y el robot se realiza mediante una conexión inalámbrica WI-FI. El robot y el PC pueden intercambiar acciones de control y obtener las medidas de los sensores hasta 10 veces por segundo. La cámara inalámbrica Trendnet TV-IP672WI

Figura 3: Arquitectura

se monta sobre la plataforma del robot para ofrecer una mayor calidad de las imágenes, como se explicará más adelante, en la sección 4. Para que el ordenador pueda tener acceso a las imágenes

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

que envía la cámara, ambos deben estar conectados a la misma red. En la Figura 3 se pueden ver las conexiones de los tres equipos.

4. MODIFICACIONES SOBRE LA PLATAFORMA ORIGINAL

4.1. Incorporación de cámara

Se ha añadido una cámara inalámbrica al sistema para realizar el reconocimiento facial. Dicha cámara cuenta con transmisión de datos WI-FI capaz de transmitir hasta 30 imágenes por segundo, con una calidad de 1.280 x 800 píxeles.

El fabricante de la cámara ofrece diferentes soluciones para acceder a las imágenes tomadas por el dispositivo. En nuestro caso, se accede a las imágenes utilizando la dirección IP de la cámara. Se utiliza la librería openCV tanto para la toma de imágenes como para el reconocimiento facial. Para poder utilizar la librería openCV en el programa de control, que está escrito en C#, se ha utilizado la librería emguCV. La librería emguCV es un "*wrapper*" o un envoltorio que permite utilizar las funciones de la librería openCV en lenguajes tipo .NET.

4.2. Desarrollo del software robot de servicio

El motivo principal por el cual se ha programado el robot en lenguaje C# es porque la librería de funciones que ofrece el fabricante está escrita en este lenguaje. El uso de la librería del fabricante permite un rápido arranque en la programación de aplicaciones. El problema es que impide el acceso a herramientas de código abierto disponibles en otros lenguajes, como por ejemplo utilizando el middleware ROS. Por ello en el futuro se plantea la migración del código a este middleware para añadir funcionalidades al robot.

En la interfaz de usuario que se aparece en la Figura 4 se encuentran las herramientas necesarias para el control del robot. En primer lugar, en la pestaña Reconocimiento se pueden añadir pacientes a la base de datos para que el robot pueda reconocerlos. Se añaden 4 imágenes del paciente desde diferentes ángulos, el nombre del paciente y la consulta en la que debe recibir tratamiento. En la pestaña de Control del robot podemos llevar a cabo las siguientes acciones:

- **Control manual del robot.** Utilizando los botones disponibles en el interfaz, se puede desplazar al robot manualmente. Esto resulta útil para realizar labores de mantenimiento como, por ejemplo, ajustar la posición del robot.

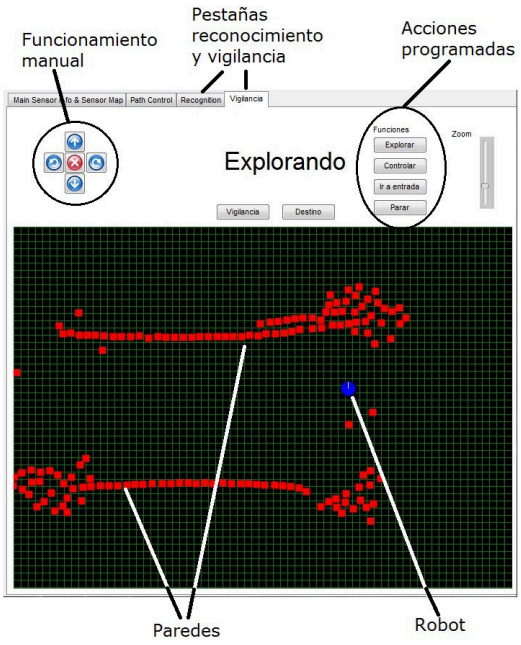


Figura 4: Interfaz de usuario

- **Explorar.** Cuando se pulsa el botón explorar, el robot inicia un reconocimiento del entorno: el robot genera un mapa de ocupación que utiliza para posicionarse en el entorno. Además este mapa se guarda en un archivo al apagar el robot, por lo que se podrá reutilizar cuando sea reiniciado.

- **Vigilar.** La acción de vigilancia es la que el robot realiza en la mayor parte de su tiempo. Cuando se pulsa el botón Controlar, el robot empieza a recibir pacientes y acompañarlos a su destino.

  Para poder realizar la acción de vigilancia, se utiliza el algoritmo de detección. El algoritmo de detección se ha implementado combinando diferentes dispositivos. La primera parte de la detección se realiza con los sensores piroeléctricos del robot. Cuando se ha detectado que el robot tiene una persona delante, se activa la cámara. El algoritmo de reconocimiento [10][12] utiliza el método de reconocimiento Eigenfaces o PCA [15] [17] para determinar si el paciente que ha detectado el robot está o no en la base de datos. Para el reconocimiento de las caras se utiliza un código libre llamado FaceRecPro [5] que utiliza el framework .NET y ha sido adaptado para funcionar en la presente aplicación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.3. Comportamientos implementados en el robot

Se han implementado una serie de comportamientos del robot que se utilizan en los distintos modos de funcionamiento descritos anteriormente.

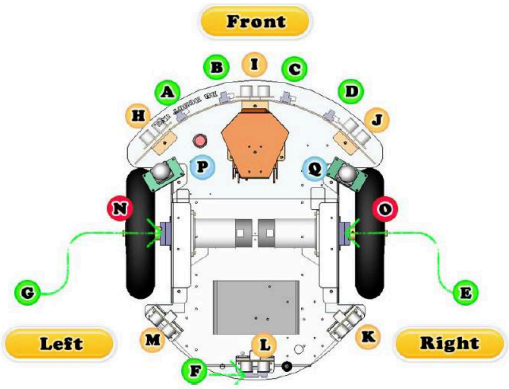


Figura 5: Sensores de rango

- Vigilar. Se pretende que el robot espere al paciente en el punto de vigilancia. Cuando el robot está en este punto activa los sensores de detección de personas P y Q de la Figura 5. En el momento en que los sensores detectan que hay una persona delante se activa el software de reconocimiento para ver si necesita ser acompañada a algún tratamiento. Entonces, si la persona se encuentra en la base de datos, el robot la acompañará hasta la consulta donde debe recibir el tratamiento, y por último volverá a su punto de vigilancia. El robot evita los obstáculos calculando rutas alternativas tanto en el camino del punto de vigilancia a la consulta como en el de regreso. Cuando el robot acompaña a un paciente a la consulta, el camino se genera de forma dinámica. El camino está formado por puntos por los que el robot puede pasar según su mapa de ocupación. Pero el robot verifica en cada punto si puede llegar al punto siguiente. En el caso de que no pueda acceder al punto siguiente, el robot generará un camino diferente. Se añadirá un nuevo obstáculo al mapa de ocupación tanto si se trata de una persona o de una puerta, por ejemplo. Pero este punto tendrá baja confianza hasta que el robot pase por la zona en repetidas ocasiones y el obstáculo permanezca en el mismo lugar.

- Seguimiento de pared. El comportamiento de seguimiento se ha programado para que el robot siga las paredes por la izquierda. Para seguir la pared se utilizan los tres sensores de la derecha del robot, sensores J y K ultrasonidos y sensor O infrarrojos en la Figura 5. El control utiliza dos de los tres sensores para mantener la distancia de seguridad a la pared. También se utilizan los sensores H e I de ultrasonidos y los A, B, C y D de infrarrojos para detectar los obstáculos de enfrente. El robot gira a la izquierda cuando encuentra obstáculos enfrente [8].

- Acompañar pacientes. En el comportamiento de acompañar al paciente, el robot utiliza la información guardada en el mapa de ocupación y la de los sensores para acompañar a los pacientes a las consultas. Por un lado, utiliza la información guardada en el mapa para calcular el camino a seguir. Por otro lado, al iniciar el camino, el robot controla por una parte que el paciente le siga y, por otra parte, que no se detecten personas u objetos móviles en el camino. Si el robot se aleja del paciente, disminuye la velocidad o se detiene. En cambio, si detecta obstáculos en el camino, el robot utiliza el módulo de evitación de obstáculos.

- Evitación de obstáculos. El módulo de evitación de obstáculos se utiliza cuando el robot está siguiendo un camino. Si el robot detecta un obstáculo. En este caso calcula un camino alternativo rodeando el obstáculo.

4.4. Fusión de datos y mapas

- Proceso de construcción de mapas. El mapa se construye tanto para ser utilizado por el usuario a la hora de introducir los puntos de vigilancia y entrada de la consulta, como para que el robot pueda posicionarse [14]. El mapa de ocupación se obtiene a partir de las lecturas de los sensores y la posición del robot. El cálculo de una zona ocupada en el mapa se obtiene de la ecuación (1). La posición del objeto O_{xy} se calcula con la posición del robot con respecto al punto de origen del mapa global R_{xy} más la posición del obstáculo detectado con respecto a la posición del robot. La posición del robot se calcula por odometría en función de las vueltas previas que han realizado las ruedas que imprimen el movimiento al robot. La posición del objeto con respecto al robot depende de la posición del sensor con respecto al centro del robot S_{xy} y la medida del sensor depende de la posición del objeto con respecto a la posición del sensor M_{xy} ecuación (2). La posición del sensor depende de la orientación del robot θ_r y de la posición inicial del sensor s_{xy}, como ilustra la ecuación

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

(3).

$$O_{xy} = R_{xy} + D_{xy} \quad (1)$$

$$D_{xy} = S_{xy} + M_{xy} \quad (2)$$

$$S_{xy} = \begin{bmatrix} Cos(\theta_r) & Sen(\theta_r) \\ -Sen(\theta_r) & Cos(\theta_r) \end{bmatrix} s_{xy} \quad (3)$$

- Fusión de datos. En este caso el robot dispone de dos tipos de sensores con características diferentes. Es necesario un criterio de selección de las medidas tomadas por los sensores, con el fin de maximizar la calidad del mapa tomado por el robot. En concreto, para añadir un nuevo obstáculo, se aceptarán las medidas que se encuentran en la zona más precisa del sensor.

  En el ambiente en el que se mueve el robot, sus sensores del robot podrían añadir nuevos obstáculos en prácticamente infinitos puntos del espacio del plano XY. Con el motivo de tener un número limitado de obstáculos, se ha implementado una función que consiste en que, antes de añadir un nuevo obstáculo al mapa de ocupación, el robot comprueba que no existe ningún obstáculo a una distancia inferior a un umbral. En el caso de que se detecte un obstáculo previo a una distancia inferior al umbral, se aumentará la confianza en el obstáculo anterior en lugar de añadir un nuevo obstáculo.

- Posicionamiento en el entorno. El robot utiliza los datos del mapa de ocupación para corregir errores acumulados. De este modo, si el sensor indica al robot que se encuentra a una distancia de una pared, pero en la base de datos la pared está a una distancia superior, el control determinará que es la posición del robot la que se debe corregir, en lugar de añadir los obstáculos correspondientes a una nueva pared a la mapa de ocupación.

- Posicionamiento por visión. El control del robot utiliza la visión artificial para rectificar la posición y orientación del robot. Después de tomar imágenes del entorno, el robot extrae las marcas que le pueden servir para posicionarse en el futuro: aristas de pilares, marcos de puertas, zócalos, etc. Cuando en sucesivas iteraciones el robot pase por las mismas coordenadas, extraerá nuevamente las marcas del entorno, compensando si es necesario su posición en función de la diferencia entre las marcas de ambas fotografías.

- Interacción con el paciente. La conversación entre el paciente y el robot está dividida en tres fases. En la primera fase, el robot se presenta al paciente enviando el siguiente mensaje de audio: "Buenos días señor *usuario*, soy el robot de servicio del hospital, ¿desea que le acompañe a la consulta *X*?". En la segunda fase de la comunicación, el robot reconoce las palabras "sí" y "no" del paciente, e inicia o cancela el acompañamiento a la consulta. Finalmente, en la tercera fase, el robot controla el proceso durante el acompañamiento y finaliza el servicio si el paciente decide no seguir al robot o llega a la consulta.

5. EVALUACIÓN PRELIMINAR

En las pruebas que se han realizado sobre el prototipo se han evaluado dos módulos. Por una parte, se ha probado la fiabilidad del módulo de reconocimiento facial y por otra parte se ha probado el robot en una aplicación piloto de atención a pacientes en ambientes hospitalarios.

5.1. Experimento 1. Reconocimiento facial

Para evaluar el funcionamiento del módulo de reconocimiento facial, se ha obtenido el número de no-detecciones que cometía el sistema ante un usuario que sí estaba registrado en la base de datos. En las imágenes guardadas en la base de datos, se han tomado imágenes desde diferentes ángulos y posiciones. Por ello el sistema resulta más robusto frente a cambios de orientación en la detección de los pacientes. La aplicación redimensiona las imágenes, las convierte a escala de grises y ajusta sus niveles. Este procedimiento se realiza para evitar problemas de reconocimiento relacionados con cambios en la iluminación. En concreto, se ha diseñado el siguiente procedimiento para realizar la evaluación.

- Se añaden las fotografías del usuario a la base de datos.
- El usuario se posiciona frente al detector en diferentes posiciones y orientaciones.
- Se obtienen las detecciones y no-detecciones.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos. El porcentaje de aciertos en la detección de los usuarios aumenta a medida que aumenta la cantidad de imágenes del usuario en la base de datos. El sistema tiene una tasa de acierto del inferior al 65 % cuando se ha cargado una única imagen en la base de datos. Cuando se cargan dos imágenes el reconocedor acierta más del 85 % de las veces. Por último, cuando se guardan 4 imágenes en la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

base de datos, los resultados de acierto superan el 93 % de los casos, lo que significa que el porcentaje de errores es inferior al 7 %. A partir de los

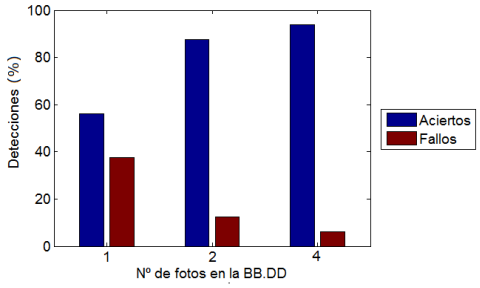


Figura 6: Resultados reconocimiento.

resultados presentados se descarta por el momento el uso de una única imagen para detectar a los pacientes. Los resultados con dos imágenes en la base de datos son bastante mejores, pero para el desarrollo del segundo experimento se tomarán 4 imágenes de cada paciente.

5.2. Experimento 2. Acompañamiento de pacientes

En este experimento se ha probado la fiabilidad del robot en la tarea de acompañar pacientes a las consultas donde deben recibir el tratamiento. Para ello se plantea un escenario en el que hay 4 consultas donde acompañar a los pacientes. Cada paciente tiene asignada una consulta; y el robot cuenta con una base de datos de 4 imágenes de cada paciente. El total de pacientes es de 50. El experimento se ha llevado a cabo en el segundo piso del edificio del DISCA. En este edificio se encuentran los despachos de algunos profesores y laboratorios de prácticas. El robot podía por tanto encontrar personas por los pasillos. Se tenía en cuenta que no se cerraran las puertas para acceder a las consultas. En la Figura 7 se muestra un esquema del escenario de la aplicación. En primer lugar, el robot ha de detectar al paciente mediante los sensores y, posteriormente, reconocerlo a través de la cámara para acompañarlo así a la consulta correspondiente. En la Figura 8 se muestran los resultados de la prueba con los pacientes acompañados correctamente, marcados en azul. Los pacientes acompañados a una consulta incorrecta están marcados en verde. Se ha comprobado que este error se debe a que, en la fase de detección, el robot ha confundido el rostro de un paciente con el de otro. En rojo se observa la tasa de fallo en el reconocimiento de un paciente (pacientes no detectados). En la gráfica se puede ver cómo el robot es capaz de reconocer y acompañar con éxito al 84 % de los pacientes, tiene problemas para reconocer al 10 % de los pacientes y tiene errores de confusión de

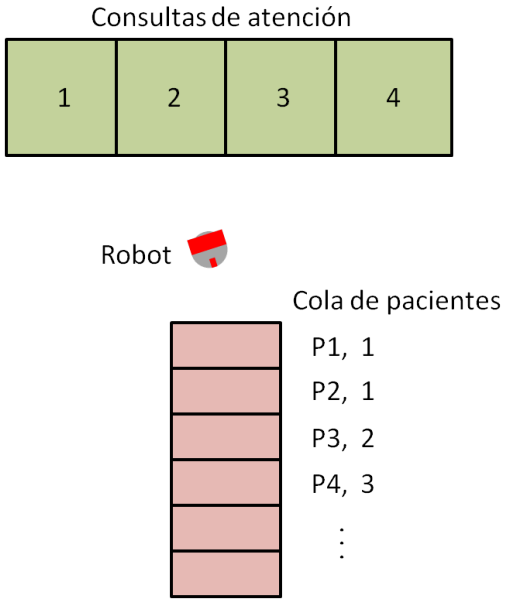


Figura 7: Escenario experimento 2.

pacientes en el 6 % de las ocasiones.

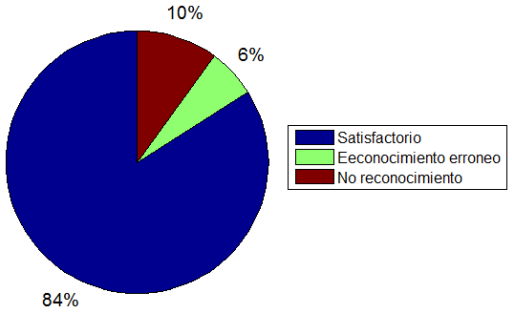


Figura 8: Resultado acompañamiento.

Analizando los resultados de este experimento se observa que ha aumentado ligeramente el número de pacientes no detectados debido al mayor número de personas que entran en juego en la escena. A pesar de ello, el robot sigue acompañando de forma correcta al 84 % de los usuarios. En un futuro, se prevé mejorar estos resultados aumentando el número de muestras en la base de datos de imágenes y del número de perfiles de cada paciente, así como aumentar el número de fotogramas por segundo y las prestaciones del procesador para soportar dicho cómputo. Otro de los aspectos que se desea analizar son los problemas sociales que puedan surgir como, por ejemplo, personas que no desean acompañar al robot o que lo abandonan cuando se ha iniciado el servicio.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

6. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado una aplicación de un robot de servicio para su uso en instalaciones hospitalarias.

Se han descrito los componentes que forman el prototipo, la plataforma robótica, la cámara de vigilancia con conexión inalámbrica y el software de control de la aplicación. También se han explicado las modificaciones realizadas sobre la plataforma robótica original, así como sobre el software de control.

El desarrollo de este prototipo nos ha permitido comprobar la viabilidad de la aplicación, integrando las diferentes herramientas software y hardware que se han planteado en este artículo.

También hemos realizado pruebas sobre el funcionamiento del robot de servicio, tras las cuales podemos avanzar en el desarrollo de la aplicación, por ejemplo en la realización de una prueba piloto en un entorno hospitalario.

Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado en parte por el proyecto PAID/2012/325 del Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de la Universitat Politècnica de València.

Referencias

[1] Arroyo, C. (2005). Cirugía robótica. Elementos: Ciencia y Cultura, 12(58), 13-17.

[2] Barrientos, A. (2002). Nuevas aplicaciones de la robótica. Robots de servicio. Avances en robótica y visión por computador. Cuenca, Ediciones Castilla-La Mancha, 288.

[3] Blanco, D., Ansari, S. A., Castejón, C., Boada, B. L., y Moreno, L. E. (2005). MANFRED: Robot Antropomórfico De Servicio Fiable Y Seguro para operar En Entornos Humanos. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 9(3), 33-48.

[4] Forlizzi, J., & DiSalvo, C. (2006, March). Service robots in the domestic environment: a study of the roomba vacuum in the home. In Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction (pp. 258-265). ACM.

[5] Gutierrez, S. A. (2011). www.codeproject.com/Articles/239849/Multiple-face-detection-and-recognition-in-real-ti.

[6] Jones, J. L. (2006). Robots at the tipping point: the road to iRobot Roomba. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 13(1), 76-78.

[7] Kam, M., Zhu, X., & Kalata, P. (1997). Sensor fusion for mobile robot navigation. Proceedings of the IEEE, 85(1), 108-119.

[8] Kim, B. (2010). CAN-2: Behaviour-based collision avoidance and formation control of multiple unmanned vehicles. RTO-TR-HFM-170, NATO Science and Technology Organization, December 2012.

[9] Otero, Á., Zunzunegui, M. V., Rodríguez-Laso, Á., Aguilar, M. D., y Lázaro, P. (2004). Volumen y tendencias de la dependencia asociada al envejecimiento en la población española. Rev Esp Salud Pública, 78(2), 201-213.

[10] Perez, C., Vicente, M. A., Fernandez, C., Reinoso, O., y Gil, A. (2003). Aplicación de los diferentes espacios de color para detección y seguimiento de caras. Proceedings of XXIV Jornadas de Automática.

[11] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., & Playter, R. (2008, July). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. In Proceedings of the 17th World Congress (pp. 10823-10825).

[12] Rama, A., y Tarrés, F. (2007). Un nuevo método para la detección de caras basado en integrales difusas. XII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio.

[13] Rao, B. S. Y., Durrant-Whyte, H. F., & Sheen, J. A. (1993). A fully decentralized multi-sensor system for tracking and surveillance. The International Journal of Robotics Research, 12(1), 20-44.

[14] Thrun, S. (2003). Learning occupancy grid maps with forward sensor models. Autonomous robots, 15(2), 111-127.

[15] Turk, M., & Pentland, A. (1991). Eigenfaces for recognition. Journal of cognitive neuroscience, 3(1), 71-86.

[16] Vera, P. S. (1996). Tercera y cuarta edad en España desde la perspectiva de los hogares. Revista Española de Investigaciones Sociológicas CIS, 73, 60.

[17] Yang, J., Zhang, D., Frangi, A. F., & Yang, J. Y. (2004). Two-dimensional PCA: a new approach to appearance-based face representation and recognition. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 26(1), 131-137.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

A segmentation approach for evaluating wear of inserts in milling machines with computer vision techniques

Guillermo Martínez-San-Martín, Laura Fernández-Robles, Enrique Alegre, Oscar García-Olalla
{gmars, lferr, ealeg, ogaro}@unileon.es
University of León

Abstract

Measuring tool wear in milling machines is an important task to evaluate the lifetime of the cutting parts (inserts) and deciding whether we should replace them. In our research, we propose to use computer vision algorithms to perform this task. Part of the research is to evaluate the accuracy of different segmentation algorithms that segment the area of wear. We have used two methods: k-Means and Mean Shift. To evaluate the segmentation results the Dice coefficient was used, obtaining with Mean Shift a $QS = 0.5923$ *for all the edges and a* $QS = 0.6831$ *just for edges with high wear.*

Keywords: segmentation, computer vision, image processing, camera, inserts, tool wear, k-means, mean shift

1 Introduction

In every manufacturing process in which milling machines are involved, the inners of the tool become wear down after some cutting operations. This wear down depends on many circumstances such as number of cuts made, material of the parts to cut, cleanliness of the machine and so on. However in the present, the inners are changed periodically just in relation with the amount of time they have been used. Apart from the cost of the inserts, the cost associated with non-productive periods during tool replacements is also an important fact to consider [5]. Also the damage caused in terms of quality, and therefore money, when using a wear down inner become a matter for the companies of this field. Diverse works [12] [10] [6] have studied this issue in order to improve the efficiency and global cost of the inners use. Nowadays, automatic computer vision algorithms could evaluate tool wear of inners and reduce inspection and replacement times.

This research arises from the need to create software capable of measuring the wear of the tools used in grinding (dry) of large steel plates that are part of wind turbine towers. These steel plates may have a thickness of up to 12 cms and are cut with a plasma torch. The temperature for this operation is so high that microcracks frequently occur, which makes interesting to provide an automatic inspection system for wear inspection.

The aims of this project can be organised in three steps:

1. Detect the inserts of head tool, crop them and segment their background.
2. Detect the cutting flank and segment the inner wear area.
3. Classify the wear of the cutting inserts into two (low and high wear) or more levels of wear. Evaluate the performance of the classification by comparing it with the labels of an expert.

The tool wear problem has been addressed in different ways, using different technologies, not only computer vision. Mainly, tool wear monitoring systems can be classified into two groups, whether if they measure tool wear directly from the cutting edge state of the tool (direct) or if the measured parameters or signals (voltage, current, vibrations,...) of the cutting process allowing to draw conclusions upon the degree of tool wear (indirect).

Systems based on computer vision, which is a direct method, can be used only when the tool is stopped. Whereas on the other hand, indirect systems can measure while they are cutting [8].

The main drawback of indirect methods is the poor precision and reliability of the measurements, mainly due to the presence of noisy signals in the process, which affect the quality of the acquired signals [2]. But by combining several signals, it is still possible to get good results. For example, a non-vision solution [7] based on fuzzy fusion of a multi-sensor data acquisition that measure the cutting force, motor power of machine tool and Acoustic Emission (AE) signal used Wavelet Fuzzy Neural Network (FNN), Regression Neural Network (NN) and Sample Classification Fuzzy Neural Network (FNN) achieving up to 92% of hit rate with the dataset presented.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Other methods [9] are based on creating a 3D laser image of the milling cutters. From this image, an automatic recognition and measurement of tool wear can be performed. Laser meter technology is highly expensive, especially when measuring distances with a 50 μm resolution.

In the context of computer vision, some authors use contour information. In 2011, Xiongxi [14] segmented the wear zone from geometric active contours. In the same line, Alegre et al. in 2008 created a signature of the wear area for classification and recognition purposes [2].

Measuring inserts wear through computer vision while the tool is working becomes a really difficult task. Nevertheless, it is possible to analyse wear debris dragged by the cycling lubricant [13]. Oil debris sensor is a popular measurement device used to collect oil condition data [8]. This sensor generates an output signature when a metallic particle is crossing through the oil return lines. However, the signal measured through the oil debris sensor is severely tainted by various noises, e.g., the background noise as well as the interferences caused by the vibrations of the structure where the sensor is mounted. Several statistical indicators can be used to measure debris particles, for example EDLWD (Equivalent Diameter of Large Wear Debris) or IPCA (Index of Particle Coverage Area). For this technique Wang et al. [11] used watershed segmentation and colony clustering algorithm.

In this work, we will focus on the first stage of the presented project, which is the segmentation of the flank inserts. The segmentation of edges is performed using two well-known methods: K-means and Mean Shift. Finally, a comparison of our segmentation with a ground truth made by an expert is carried out through Dice Coefficient measure [1].

The rest of the paper is organised as follows: In section 2, we show the data set used. Section 3 presents the segmentation algorithms while in section 4 the experiments and results are detailed and discussed. Lastly, we draw some conclusions of the work in section 5.

2 Data set.

Due to the lack of public inners data sets, we have created our own set of images. Images have been taken with a monochrome camera, model Genie M1280 1/3″ that rides an 25mm optic AZURE. Focus and aperture are manual. In order to improve the contrast of gray scale images two bars of red LEDs (BDBL-R82/16H) have been used. We have taken two types of shots, first the cutting heads which include all the visible inserts (Figure 1 on the right) and secondly capturing just the inserts under an uniform background (Figure 2 left). In this work, only the last set is considered.

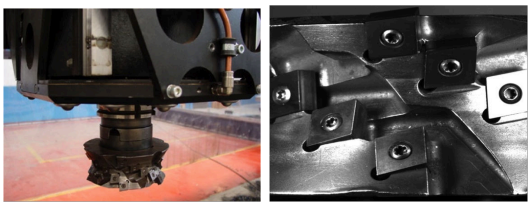


Figure 1: (left) Head Tool. (right) Detail of a head tool with several inserts.

After that, the inserts were segmented manually, getting rid of the background of the image (see Figure 2, middle). Once the foreground is isolated, we proceeded also to define the wear area which defines our region of interest (ROI). A mask of this ROI was created (Figure 2 right) making up the ground truth.

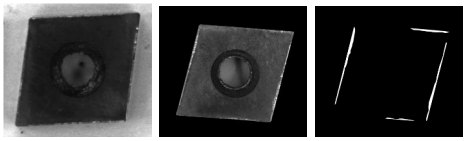


Figure 2: Captured (left), isolated (middle) and ground truth (right) of an insert.

The dataset contains 53 images of different inserts. Since an insert has 4 cutting edges, one in each side of the square, a total of 212 edges (53×4) were acquired and segmented. This crop was performed automatically. One edge and its corresponding ground truth can be seen in Figure 3.

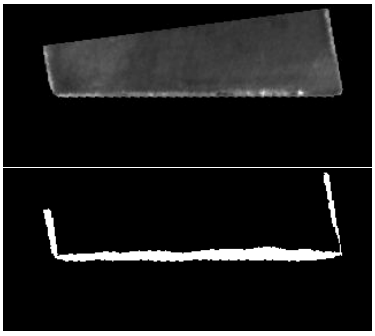


Figure 3: Edge (top) and its ground thruth (bottom).

One of the most important problem encountered during the capture and segmentation was the light reflection on inserts. In order to avoid metal reflections, an exhaustive study of the best position

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

of the LEDs was performed, demostrating that in this case, the use of polarized filters would not have improved the captures.

3 Segmentation algorithms

We have used two clustering algorithms for segmentation, k-Means and Mean Shift. Since background was segmented manually and the colour of the edges is quite uniform, we believe they are the most effective for this problem [4]. Other algorithms such as thresholding or watershed are not appropriate for this problem because in real applications the inserts are over the head tool which has the same color as the insert and therefore there is not contrast.

3.1 K-Means

K-Means is a data mining method based on clustering that can be use for image segmentation. The algorithm accepts two inputs, the data and the number of clusters "K". K in a vision problem is the number of regions in which we divide the image. The output is K clusters with input data partitioned among them. We tested different values for K, being $K = 4$ the best value which represents three regions: background, insert body and edge wear. The aim is to group items into K clusters in order that all items in same cluster are as similar among them as possible and items that are not in same cluster are as different as possible. We use distance measures to calculate similarity and dissimilarity.

We want to minimize the intra-cluster and maximize inter-cluster distance as represented in the Figure 4.

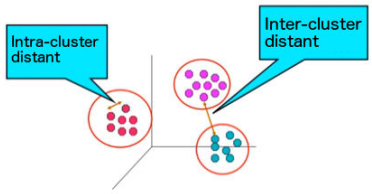


Figure 4: kMeans representation. Dots with the same colour belong to the same cluster.

3.1.1 K-Means algorithm

K-Means algorithm is composed of the following steps:

1. First, randomly choose k items (points of image) as initial centroids. Each cluster has a centroid that is the most representative item of the cluster (typically the center of a cluster).
2. For each point, find the nearest centroid and assign the point to the cluster associated with the nearest centroid.
3. Update the centroid of each cluster based on the items in that cluster. Typically, the new centroid will be the average of all points in the cluster.
4. Repeat 2 and 3 until there are no changes in the clustering.

3.2 Mean Shift

Mean Shift is a powerful and versatile non parametric segmentation algorithm, which does not require prior knowledge of the number of clusters, and does not constrain the shape of the cluster. It was originally presented in 1975 by Fukunaga and Hostetler [3]. Mean shift considers feature space as an empirical probability density function. If the input is a set of points then Mean Shift considers them as a sample from the underlying probability density function. If dense regions (or clusters) are present in the feature space, then they correspond to the mode (or local maxima) of the probability density function. We can also identify clusters associated with the given mode using Mean Shift. Mean Shift associates each data point with the nearby peak of the datasets probability density function. For each data point, Mean shift defines a window around it (we use a 10 pixel window) and computes the mean of the data point. Then it shifts the center of the window to the mean and repeats the algorithm until it converges. After each iteration, we can consider that the window shifts to a denser region of the dataset.

3.2.1 Mean Shift algorithm

The algorithm of mean shift is detailed in the following steps:

1. Fix a window around each data point.
2. Compute the mean of data within the window.
3. Shift the window to the mean and repeat until convergence.

4 Experiment and results

In order to evaluate the accuracy of segmentation, we created the ground truth described in section 2. This labelled wear pixels of the edges are useful to compare with the automatic segmentation provided with k-Means and Mean Shift.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

In this work we will perform the experiments with the set of images with segmented background (Figure 3, top). We apply k-Means and Mean Shift as described in the previous section. In Figure 5 we show several edges, the ground truth of the wear edge, the segmentation with k-Means and the segmentation with Mean Shift.

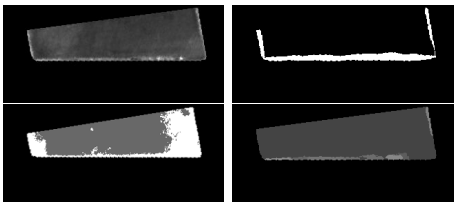


Figure 5: (top left) Original edge used for the experiment. (top right) Ground truth of the edge wear. (bottom left) k-Means segmentation. (bottom right) Mean Shift segmentation.

How can we distinguish the worn region? Segmentation is not accurate and gives several regions. One way to distinguish them is assuming that the largest region belongs to the background, the second largest to the body of the insert, and the rest should belong to the wear area. Consequently, we create a binary image putting wear area to white (0) and the rest to black (1). Now we have two binary images, one automatically segmented with the proposed method and the manual ground truth segmented by an expert to compare with. Applying a bitwise AND operation on the two images, we can get the common pixels. After that, we calculate Dice coefficient [1] following the equation (1).

$$QS = \frac{2C}{A+B} \tag{1}$$

where C are the number of common pixeles between the segmented output and the ground truth, A and B are the number of white pixels (wear area) of the ground truth image and the segmented output respectively.

For the implementation we have used OpenCV kMeans and Meanshift functions (with GPU) with different parameters as shown below.

On the one hand, for k-Means we looked for the optimal number of clusters, the k parameter of k-Means. In Figure 6, QS in relation with the k value is shown. The best result is achieved for $k = 4$ with a $QS = 0,4622$. This situation corresponds with the three regions: background, insert and wear as mentioned.

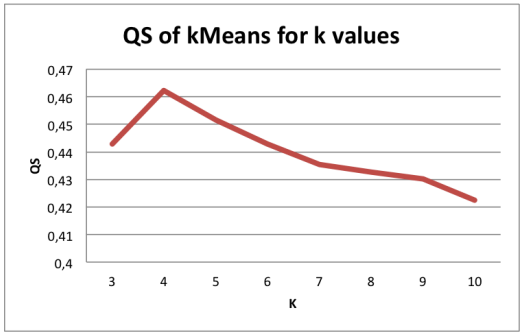


Figure 6: QS of kMeans for different k values

On the other hand, for Mean Shift we looked for the number of iterations and the segment size parameters. Figure 7 presents the results for different number of iterations and a minimum segment size of 10 pixels, demostrating that using only one iteration outperforms the rest with a $QS = 0,5923$. In Figure 8 we show the results with one iteration for different minimum sizes of the segment. The best result is achieved for a size equals to 10 pixels.

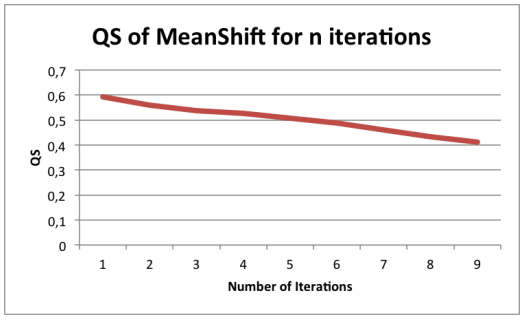


Figure 7: QS of Mean Shift for n iterations

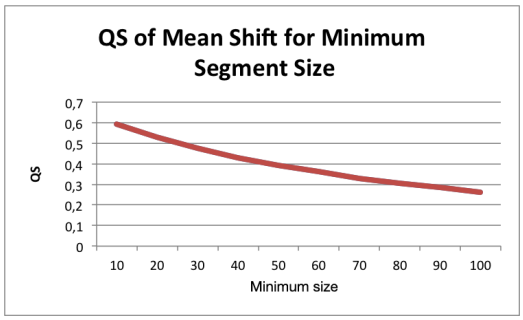


Figure 8: QS of Mean Shift for Minimum Segment Size

Therefore, Mean Shift proved to be more suitable for this problem than k-Means.

Moreover, we want to show the performance of Mean Shift depending on the level of the wear

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

(low, medium or high wear) (see Table 10). As we can observe, the performance improves when the area of the wear increases. It is easier to segment highly worn inserts.

Wear	no. Elements	QS
Low	45	0,4582
Medium	124	0,6083
High	42	0,6831
Total	212	0,5923

Figure 9: QS Performance for different wear levels with Mean Shift.

Similarly, the performance for kMeans depending on the level of the wear.

Wear	no. Elements	QS
Low	45	0,3319
Medium	124	0,4796
High	42	0,5483
Total	212	0,4622

Figure 10: QS Performance for different wear levels with kMeans.

5 Conclusions

In this paper, we have presented a recent concern of companies that work with milling machines related with the measuring of tool wear of cutting inserts. We have proposed a method to segment wear of edges inserts in a black background. The segmentation was carried out with two well known methods: k-Means and Mean Shift. QS measure was used to compute the accuracy of the segmentation in comparison with an expert manual segmentation. Different parameters such as the number of clusters in k-means and the number of iterations and the minimum segmentation size in Mean Shift were studied.

Clearly, Mean Shift offers the best segmentation approach with one iteration and minimum segment size of 10 pixels, achieving a $QS = 0,5923$ which seems to be quite satisfactory. Besides, we have studied the effect of the level of wear in the accuracy of the segmentation. We can confirm that edges with a bigger area of wear are better segmented obtaining a QS equals to 0.6831. We should highlight that the results are highly dependent on a correct ground truth segmentation.

In the future, we plan to extend this work for edges with a non segmented background and later on to segment directly from a general image of the tool.

Acknowledgements

This work has been supported by DPI2012-36166 grant and the pre-doctoral FPU fellowship program supported by the Spanish Government (AP2010-0947).

References

[1] Dice coefficient. `http://en.wikipedia.org/wiki/SrensenDice_coefficient`.

[2] Alegre E, Alaiz R, Barreiro, J, and Ruiz J. Tool wear classification using shape signatures from digital images and neural networks. *6th International DAAAM Baltic Conference. "INDUSTRIAL ENGINEERING"*, 2008.

[3] K. Fukunaga and L. Hostetler. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 21(1):32–40, Jan 1975.

[4] L.Z. Jiang G.M. Chen, Y.B. Xie. Application study of color feature extraction on ferrographic image classifying and particle recognition. *China Mechanical Engineering*, 2006.

[5] J Kopač and S Šali. Tool wear monitoring during the turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1–3):312 – 316, 2001. 5th Asia Pacific conference on Materials processing.

[6] S. Kurada and C. Bradley. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, 34(1):55 – 72, 1997.

[7] Jianping Liu and Bangyan Ye. Fuzzy fusion of multi-sensor data for tool wear identifying. 3:570–573, Oct 2008.

[8] Mohit Pant, Sandeep Sunori, and Anu Gupta. Vision base tool monitoring system for a reconfigure micro factory system. *International Journal of Computer Applications*, 40(6):36–39, February 2012. Published by Foundation of Computer Science, New York, USA.

[9] O. Ryabov and K. Mori. Laser sensor for imaging and detection of cutting tool wear. *Sensors for Industry Conference, 2002. 2nd ISA/IEEE*, pages 44–46, Nov 2002.

[10] R. Teti. Machining of composite materials. {*CIRP*} *Annals - Manufacturing Technology*, 51(2):611 – 634, 2002.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[11] Jingqiu Wang, Long Zhang, Fengxia Lu, and Xiaolei Wang. The segmentation of wear particles in ferrograph images based on an improved ant colony algorithm. *Wear*, 311(1–2):123 – 129, 2014.

[12] A. Weckenmann and K. Nalbantic. Precision measurement of cutting tools with two matched optical 3d-sensors. {*CIRP*} *Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):443 – 446, 2003.

[13] Tonghai Wu, Yeping Peng, Hongkun Wu, Xiaogang Zhang, and Junqun Wang. Full-life dynamic identification of wear state based on on-line wear debris image features. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2):404 – 414, 2014.

[14] Guangxi Xiong, Jiancheng Liu, and A. Avila. Cutting tool wear measurement by using active contour model based image processing. *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, pages 670–675, Aug 2011.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN FOTOBIORREACTORES TUBULARES

G. A. Andrade*, D. J. Pagano*, J.L. Guzmán**, M. Berenguel**
* Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900 Florianópolis, SC, Brazil {gustavo.artur@posgrad.ufsc.br, daniel.pagano@ufsc.br}
**Departamento de Informática, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n 04120 Spain, {joseluis.guzman, beren}@ual.es

Resumen

Actualmente, las microalgas se consideran como una prometedora fuente de biocombustible y otros productos químicos de gran valor añadido (cosméticos, complementos alimenticios, etc.). Para lograr una alta productividad de biomasa a partir de microalgas es importante optimizar su rendimiento. El propósito principal de tal sistema de optimización es calcular la tasa de dilución óptima para producir biomasa. En este artículo, se propone una estrategia de optimización basada en la teoría de la programación no lineal con el fin de maximizar la productividad de biomasa. La estrategia desarrollada ha sido evaluada numéricamente mediante el uso de un modelo matemático de crecimiento de microalgas en fotobiorreactores tubulares.

Palabras clave: Producción de microalgas, Fotobiorreactor tubular, Optimización, Programación no lineal

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha existido un creciente interés en la cultura de microalgas para la producción de biomasa, debido fundamentalmente a su alto rendimiento fotosintético en comparación con las plantas terrestres [5]. Son múltiples las aplicaciones de la biomasa a partir de microalgas que se pueden ver en la literatura. Decenas de especies de algas se utilizan para producir alimentos para animales, la nutrición humana, los cosméticos y industria farmacéutica [13]. Las microalgas también pueden absorber los metales pesados y degradar muchas clases diferentes de compuestos tóxicos. Además, recientes revisiones apuntan a las microalgas para ser la única fuente de biodiesel renovable capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte, con el potencial de desplazar la dependencia actual de los combustibles fósiles [8, 15].

A pesar de su reconocida utilidad, la biotecnología de algas han progresado lentamente [13]. El actual lucro de la biomasa es muy bajo, se estima una productividad de 9000 t de materia seca por año, con un precio entre 30 y 300 €/kg [1]. Sin embargo, para ser competitivo en el mercado de la bioenergía, la producción de microalgas debe aproximarse a los precios y capacidad de otros cultivos terrestres. Desde el punto de vista de la aplicación a escala industrial, el problema del uso de microalgas para producir biomasa es justificar los altos costos de instalación, operación y mantenimiento. La tecnología utilizada en fotobiorreactores debe escalarse en varios órdenes de magnitud para contribuir significativamente a el mercado de los biocombustibles. No sólo el diseño de los fotobiorreactores se debe mejorar, sino también es importante asegurar su funcionamiento óptimo y económico por medio de estrategias de control y técnicas de optimización.

Este artículo se centra en la optimización del cosechamento de microalgas en fotobiorreactores que utilizan la irradiancia solar como fuente de luz. En la literatura se pueden encontrar varios métodos para abordar este problema. Sin embargo, la mayoría de ellos consideran el fotobiorreactor con fuente artificial de luz, lo que hace el problema de optimización más fácil a la hora de alcanzar el máximo. La productividad máxima se puede alcanzar mediante el mantenimiento de la intensidad de la luz en un valor constante y a continuación, el problema de optimización se traduce en un problema de control regulatorio [3]. Ejemplos de estrategias para hacer frente a este problema son control predictivo no lineal [3], control baseado en pasividad [14], control no lineal adaptativo [12], o linealización por realimentación [4].

Sin embargo, en los fotobiorreactores que utilizan la irradiancia solar como fuente de luz, la máxima productividad no es trivial debido al ciclo de luz periódica. Una solución para tratar estos casos puede ser planteada mediante el uso de la teoría de control óptimo [10]. El problema de control óptimo consiste en la búsqueda de la evolución temporal de las variables manipuladas, maximizando una función de coste en un horizonte temporal finito. Este problema se puede resolver por métodos indirectos tales como prin-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cipio del máximo de Pontryagin o por métodos directos (optimización numérica). La ventaja de usar el principio del máximo de Pontryagin es el de proporcionar una solución analítica. Sin embargo, el modelo matemático del sistema debe ser simple para proporcionar el uso de este método. Cuando el modelo matemático del sistema es complejo, los métodos numéricos son los más apropiados.

En este trabajo, se utiliza una formulación NP (Nonlinear Programming - en inglés), debido a la complejidad del modelo matemático del fotobiorreactor [9]. La idea de este método de optimización es discretizar el problema de control para tener un problema de optimización de dimensión finita. Este método utiliza sólo el control y las variables de estados como variables de optimización y dispensan por completo el uso de las *variables adjuntas*, necesarias en la teoría clásica del principio máximo de Pontryagin. La optimalidad de la solución puede ser demostrada por medio de las condiciones necesarias de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) y la suficiencia a través de condiciones de segundo orden [2, 6]. La estrategia de optimización desarrollada en este trabajo ha sido evaluada mediante simulaciones numéricas en un fotobiorreactor tubular, donde el modelo matemático del sistema fue desarrollado previamente en [9].

Este artículo esta organizado de la siguiente forma. En la segunda sección se realiza una breve descripción de la planta. En la siguiente sección se describe el problema de programación no lineal para optimizar la productividad de la biomasa. En la cuarta sección se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, en la última sección se muestran las conclusiones obtenidas y trabajos futuros.

2 EL FOTOBIORREACTOR TUBULAR

El modelo matemático del fotobiorreactor utilizado en este artículo para probar la estrategia optimización se basa en uno del tipo tubular que está localizado en la Estación Experimental las Palmerillas, propiedad de la Fundación Cajamar (Almería, España), que se encuentra dentro de un invernadero donde se cultiva la microalga *Scenedesmus Almeriensis*. En la Figura 1 se muestra una imagen del reactor.

Este reactor tiene una capacidad de 2600 L, una logitud de 19.0 m y una anchura de 0.7 m. Básicamente, este reactor tiene dos partes principales: (i) el lazo externo y (ii) la columna de burbujeo.

El lazo externo está formado por 400 m lineales

Figura 1: Fotobiorreactor tubular de la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar.

de tubos de metacrilato de 84 mm de diámetro externo, con una capacidad de 2200 L, unidos mediante conexiones y codos de PVC. Su estructura fue óptimamente diseñada para maximizar la intercepción de la radiación solar, reducir al mínimo la resistencia del flujo y ocupar la superficie mínima para reducir la demanda de tierra. El objetivo del lazo externo es aumentar la surperficie expuesta al sol para que microalgas capten una mayor cantidad de radiación y realizen la fotosíntesis. Cuando realizan la fotosíntesis, las microalgas consumen CO_2 y generan O_2, lo que provoca una subida del pH del cultivo. Entonces, es necesario mantener su valor controlado, debido al hecho de que altos valores de pH pueden causar daños a las microalgas. Por lo tanto, el control del pH se realiza en el lazo externo del fotobiorreactor por medio de inyección de CO_2.

La columna de burbujeo tiene 3.25 m de alto por 0.5 m de diámetro, con una capacidad de 400 L, y cumple varias funciones. Por un lado, se utiliza para mezclar el cultivo mediante el burbujeo de aire a un caudal aproximado de 140 L/min, lo que permite la desorción del O_2 producido durante la fotosíntesis por las microalgas. Por otro lado, en la columna también se lleva a cabo el control de la temperatura del cultivo, mediante un intercambiador de calor tubular. Además, en la columna se añaden los nutrientes y se obtiene el cosechado por un rebosadero situado en la parte superior. El cultivo es recirculado continuamente entre el lazo y la columna mediante una bomba de impulsión situada en la parte inferior de la columna.

2.1 MODELO MATEMÁTICO DE UN FOTOBIORREACTOR TUBULAR

Esta sección resume brevemente el modelo dinámico de la producción de microalgas del fo-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tobiorreactor tubular que se utilizará para llevar a cabo la optimización. El lector interesado puede encontrar más información en [9].

El modelo para un sistema de producción de microalgas debe tener en cuenta la relación entre la disponibilidad de la luz y la tasa de fotosíntesis, la mezcla y la transferencia de masa gas-líquido en el interior del sistema. Además, el modelo dinámico se divide en dos subsistemas. Uno para describir la dinámica del lazo externo y otro par describir la dinámica en la columna de burbujeo.

El lazo externo se describe por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas que toman la siguiente forma

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mathbf{A}(t,x)\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{H},t,x) \tag{1}$$

donde $\mathbf{H}$ es el vector de estados, siendo ellos, concentración de biomasa, carbono inorgánico total, concentración de oxígeno disuelto, fracción molar de oxígeno y dióxido de carbono; $\mathbf{H} \in \mathscr{H}^5[(0,L),\mathbb{R}^5]$, donde $\mathscr{H}^5$ es el espacio infinito dimensional de *Hilbert* definido en el intervalo $[0,L]$, $x \in [0,L] \subset \mathbb{R}$ y $t \in [0,\infty)$ denotan el espacio y tiempo, respectivamente. $\mathbf{A}$ es una matriz 5×5 y $\boldsymbol{\phi}$ es un vector 5×1. Las expressiones para $\mathbf{A}$ y $\boldsymbol{\phi}$ se pueden ver en [9].

Para la columna de burbujeo, una formulación similar se puede aplicar teniendo en cuenta varias consideraciones. Esta parte del sistema se considera perfectamente mezclada, y por lo tanto este subsistema se describe por ecuaciones diferenciales ordinarias. Además, el proceso de dilución (variable de control en este trabajo) se añadió en la fase líquida. El modelo de este subsistema se puede describir como

$$\frac{d\mathbf{E}}{dt} = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{E},t) + \mathbf{B}u(t) \tag{2}$$

donde $\mathbf{E}$ es el vector de estados de la columna, siendo ellos, concentración de biomasa, carbono inorgánico total, concentración de oxígeno disuelto, fracción molar de oxígeno y dióxido de carbono; $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^5$. La variable $u(t)$ es el caudal de medio, $u(t) \in \mathbb{R}$. $\boldsymbol{\psi}$ y $\mathbf{B}$ son matrices con dimensiones adecuadas. Para la expresión de $\boldsymbol{\psi}$ y $\mathbf{B}$ el lector debe ver [9].

3 OPTIMIZACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR

En esta sección se describe la formulación del problema de optimización del fotobiorreactor tubular. El esquema de optimización numérica utilizada en este trabajo se basa en el *concepto de parametrización de control* [11]. La variable de control, $u(t)$, es discretizada en M valores constantes a lo largo del horizonte de control $[t_0,t_f]$, tal que $\tau_k \in [t_0,t_f]$, $k = 1,\ldots,M$, es la malla de control

$$t_0 = \tau_1 < ... < \tau_{M-1} < \tau_M = t_f$$

Por lo tanto, el vector de control, en los puntos de la malla de control, se define como

$$U = [u_0 \;\; u_1 \;\; \cdots \;\; u_{M-1}]^T \tag{3}$$

siendo la región admisible

$$\mathscr{A} \equiv \{u : g_k(u_k) \leq 0, h_k(u_k) = 0\} \subseteq \mathbb{R}^r \tag{4}$$

donde $k = 0, 1, ..., M-1$, $g_k(u_k) : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$, $h_k(u_k) : \mathbb{R}^v \to \mathbb{R}^q$, son las restricciones en la variable de control.

Además, con el uso de este enfoque de optimización, el sistema (1)-(2) debe ser discretizado. La aproximación discreta del modelo del fotobiorreactor implica un esquema de *diferencias finitas de Euler* para el tiempo y el espacio. En primer lugar, el modelo de parámetros distribuidos del lazo externo del fotobiorreactor se puede convertir a un sistema de parámetros concentrados usando el *método de las lineas*. El método de las lineas es un enfoque para la conversión de una ecuación diferencial parcial en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Usando esta discretización, la derivada espacial, en un determinado instante de tiempo, es aproximada por

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = \frac{\mathbf{H}_j - \mathbf{H}_{j-1}}{\Delta x}$$

donde $\Delta x = L/S$ es la longitud de la discretización de la derivada espacial, siendo S el número de puntos que se desea hacer la discretización espacial, y $j = 1,\ 2,\ldots,S$ es el j-ésimo volumen espacial. Utilizando este enfoque de discretización, el modelo del lazo externo se aproxima por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias en las que el número de estados depende de S, por lo tanto $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{5S}$.

Es posible unificar los dos submodelos del fotobiorreactor en una sola expresión discreta en el tiempo dada por

$$\mathscr{X}_{k+1} = \mathscr{X}_k + \vartheta(\mathscr{X}_k, u_k) \tag{5}$$

donde

$$\mathscr{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k,j} \\ \mathbf{E}_k \end{bmatrix},$$

$$\vartheta = \begin{bmatrix} T_s\mathbf{A}_k\frac{\mathbf{H}_{k,j}-\mathbf{H}_{k,j-1}}{\Delta x} + T_s\boldsymbol{\phi}_k(\mathbf{H}_{k,j}) \\ T_s\boldsymbol{\psi}_k(\mathbf{E}_k) + T_s\mathbf{B}u_k \end{bmatrix},$$

$\mathscr{X}_k \in \mathbb{R}^{5S+5}$, $\mathbf{A}_k$ es una matriz $5S \times 5S$ y $\boldsymbol{\phi}_k$ es un vector $5S \times 1$ y $\vartheta \in \mathbb{R}^{5S+5}$. T_s es el periodo de muestreo con respecto a la discretización

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la derivada en el tiempo. Para simplificar la notación se supone que la discretización en (5) es equidistante a lo largo del horizonte de control,

$$T_s = \frac{t_f - t_0}{M-1}, \;\; \tau_k = t_0 + (k-1)T_s, \;\; k = 1, \; ..., \; M$$

donde k representa el k-ésimo instante de tiempo discreto.

El objetivo de la optimización en fotobiorreactores es maximizar el rendimiento de la biomasa producida. La producción de biomasa en fotobiorreactores depende de la velocidad de crecimiento del cultivo. Por un lado, cuando no hay irradiación solar el fenómeno de respiración ocurre en el reactor, donde la biomasa es convertida en dióxido de carbono representando pérdida de biomasa. Por otro lado, durante el periodo solar, las microalgas realizan la fotosíntesis, lo que permite el crecimiento de las células. Sin embargo, el crecimiento de las células provoca un efecto de sombra en el reactor, causando una caída substancial en la velocidad de crecimiento del cultivo. Además, otros efectos de limitación de crecimiento están presentes en los fotobiorreactores, tales como falta de nutrientes y presencia de compuestos inhibidores en el medio de cultivo. Finalmente, la velocidad de crecimiento del cultivo puede ser gestionada mediante una gestión adecuada del caudal de medio del cultivo [3, 10].

Teniendo en cuente que las variables que se están maximizando son $z = [\mathscr{X}_0 \;\; \mathscr{X}_1 \;\; ... \;\; \mathscr{X}_M \;\; u_0 \;\; u_1 \;\; ... \;\; u_M] \in \mathbb{R}^{N_z}$, donde $N_z = (5S+5+1)M$, y que la biomasa medida en la columna de burbujeo del fotobiorreactor se denotada por x_1, entonces el problema de la maximización de la productividad en el intervalo $[t_0, \; t_f]$ se puede describir como

$$\begin{aligned} \max_z \mathscr{J}(z) = \;\; & \max_z \sum_{k=1}^{M-1} u_k x_{1,k} \\ \text{sujeto a} \quad & \\ & \mathscr{X}_{k+1} = \mathscr{X}_k + \vartheta(\mathscr{X}_k, u_k) \\ & \mathscr{X}_0 = \xi \\ & x_{1,M} = x_{1,0} \\ & 0 \leq u_k \leq 10 \end{aligned} \tag{6}$$

donde ξ es la condición inicial para los estados del modelo. El horizonte de control se ha seleccionado para ser de 24 horas. La restricción terminal $x_{1,M} = x_{1,0}$ se incluye para garantizar el mismo punto de funcionamiento del fotobiorreactor cada día. Además, se considera que el caudal de medio está limitado por los límites de la válvula.

El problema de optimización (6) tiene un gran número de variables de optimizacion y restricciones, debido a la discretización de la variable de control y de las ecuaciones del sistema. Sin embargo, se puede solucionar de manera eficiente teniendo en cuenta la estructura dispersa en el *Jacobiano* de las restricciones y de la *Hessiana* del *Lagrangiano* asociado.

En este artículo, el algoritmo SQP (Sequential Quadratic Programming - en inglés) es utilizado para resolver el problema (6). El algoritmo SQP es un procedimiento iterativo para optimización no lineal. En cada paso del procedimiento se resuelve un sub-problema cuadrático basado en la linealización de la función de coste con respecto a las restricciones. A través de la solución del sub-problema cuadrático se obtiene la dirección de búsqueda, donde la función de coste es minimizada. Además, para hacer cumplir la convergencia desde cualquier punto de partida se utiliza un método de búsqueda de línea con una función de mérito.

La condición necesaria de optimalidad de (6) viene dada por las condiciones KKT. Para una mejor legibilidad de los desarrollos que siguen a continuación, la condición inicial, la restricción terminal de la concentración de la biomasa y las restricciones de la variable de control se reescriben respectivamente a $\Phi_0(\mathscr{X}_0)$, $\Phi_M(\mathscr{X}_M)$ y $g_k(u_k)$; lo que permite expresar el Lagrangiano como

$$\begin{aligned} \mathscr{L}(z) = \mathscr{J}_k + \rho_0 \Phi_0(\mathscr{X}_0) + \rho_M \Phi_M(\mathscr{X}_M) + \\ \sum_{k=1}^{M} \lambda_k^T g_k(u_k) - \sum_{k=0}^{M-1} \mu_{k+1}^T (\mathscr{X}_{k+1} - \mathscr{X}_k - \\ \vartheta(\mathscr{X}_k, u_k)) \end{aligned} \tag{7}$$

donde $\rho_0 \in \mathbb{R}$, $\rho_M \in \mathbb{R}$, $\lambda_k \in \mathbb{R}^2$, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \;\; \lambda_2 \;\; ... \;\; \lambda_M]^T \in \mathbb{R}^{2M}$, $\mu_k \in \mathbb{R}^{5S+5}$ y $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \;\; \mu_2 \;\; ... \;\; \mu_M]^T \in \mathbb{R}^{(5S+5)M}$ son multiplicadores de Lagrange. Evaluando las condiciones KKT a partir de (7) se obtiene

$$\begin{aligned} \mu_k - \mu_{k+1} &= \left(\frac{\partial \vartheta_k(\mathscr{X}_k, u_k)}{\partial \mathscr{X}_k} \right)^T \mu_{k+1} \\ &\quad + \frac{\partial \mathscr{J}_k}{\partial \mathscr{X}_k} && (8) \\ \mu_M &= \left(\frac{\partial \Phi_M}{\partial \mathscr{X}_M} \right)^T \rho_M && (9) \\ \nabla_{u_k} \mathscr{L}(z) &= 0 && (10) \\ \rho_0 \Phi_0(\mathscr{X}_0) &= \rho_M \Phi_M(\mathscr{X}_M) = 0 && (11) \\ \lambda_k^T g_k(u_k) &= 0 && (12) \end{aligned}$$

La Ecuación (8) es la versión discreta de las variables adjuntas, la Ecuación (9) es la versión discreta de la condición de tranversalidad, la condición de estacionariedad para el control es dada por (10) y las condiciones de holgura complementaria son dadas por (11)-(12).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Suponiendo que la secuencia de control $\hat{u}_0$, $\hat{u}_1$, ..., $\hat{u}_{M-1}$ y la correspondiente trayectoria $\hat{\mathscr{X}}_0$, $\hat{\mathscr{X}}_1$, ..., $\hat{\mathscr{X}}_{M-1}$ es óptima para el problema (6), entonces es sencillo demonstrar que existen multiplicadores de Lagrange $\boldsymbol{\lambda} \geq 0$ y multiplicadores de Lagrange ρ_0, ρ_M, $\boldsymbol{\mu}$, no todos nulos, de tal forma que (8)-(12) son satisfechas. Debido a la larga demostración requerida para esta prueba, se ha considerado omitirla de este artículo, pero el lector interesado puede consultar más detalles en [11].

Por otro lado, además de las condiciones necesarias de optimalidad, también es necesario demostrar la suficiencia. Sea $\bar{z}$ una solución óptima que satisface las condiciones necesarias y considerando que el conjunto activo para cualquier punto factible es definido $\mathscr{I} = \{k \in \{0, ..., M-1\} | g_k(u_k) = 0\}$, entonces, condiciones suficientes de optimalidad pueden imponerse en el problema (6) teniendo en cuenta las siguientes hipótesis [2]

1. *La función de coste y las restriciones en (7) son dos veces continuamente diferenciable con respecto a* z;
2. *los gradientes en* $g_k(u_k)$, $\Phi_0(\mathscr{X}_0)$, $\Phi_M(\mathscr{X}_M)$ *y* $(\mathscr{X}_{k+1} - \mathscr{X}_k - \vartheta(\mathscr{X}_k, u_k))$ *son linealmente independientes*;
3. *la complementariedad estricta* $\boldsymbol{\lambda} > 0$ *de los multiplicadores de Lagrange se mantiene*;
4. *la Hessiana del Lagrangeano es positiva definida*

$$\mathbf{d}^T \nabla^2 \mathscr{L}(\bar{z}) \mathbf{d} > 0 \tag{13}$$

donde $\boldsymbol{d} \in C = \{\boldsymbol{d} \neq 0 | \nabla g_k(u_k)^T \boldsymbol{d} = 0, \ \forall i \in \mathscr{I}\}$. *Observe que* C *es un cono.*

Entonces $\bar{z}$ es minimo local de (6). En [6] se demostró que una comprobación numérica de la condición descrita arriba consiste en evaluar la Hessiana proyectada en C y verificar que sus valores propios son positivos.

Además, es possible demonstrar que, considerando la forma de limitación del problema (6) como $M \to \infty$, $T_s \to 0$, las condiciones KKT (8)-(12) son equivalentes a las condiciones necesarias del control óptimo continuo [11]. Los multiplicadores de Lagrange se pueden interpretar como aproximaciones discretas a las variables adjuntas de control óptimo.

En [6] se demostró que es possible estimar las variables adjuntas a partir de la expresión explicita de los multiplicadores de Lagrange de (8)-(12). Básicamente, el enfoque propuesto en [6] es el siguiente. El algoritmo SQP proporciona el multiplicador de Lagrange $\rho_M \in \mathbb{R}$. Entonces, es posible obtener τ_M a través de la condición de transversalidad (9). Luego, por un cálculo recursivo es posible calcular τ_k, $k = M-1$, ..., 1.

4 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de simulación para demostrar la eficiencia de la técnica de optimización propuesta. Para este objetivo, se utiliza el modelo presentado en la Sección 2 para a evaluar el problema de optimización.

Se considera que el pH está regulado adecuadamente por medio de un control PI con un esquema de control por adelanto en torno a una referencia óptima de $pH_{ref} = 8$. Además, la irradiancia solar utilizada para la simulación se obtiene a partir de un modelo meteorológico [7]. Este modelo proporciona la predicción de la irradiancia solar de Almería, donde se encuentra el fotobiorreactor.

La Tabla 1 muestra la influencia del número de puntos de la malla de control. M es el número de puntos de la malla, CPU es el tiempo de cálculo en segundos, $\mathscr{J}$ es la función de coste en g $(\text{L}\cdot\text{día})^{-1}$, y ERR denota el error relativo de la solución. Las pruebas se realizaron en una estación de trabajo con procesamiento Intel Core i7® @2.00 Gigahertz y 4096 KB de memoria cache.

Tabla 1: Comportamiento de convergencia del problema de optimización del fotobiorreactor.

M	CPU (s)	$\mathscr{J}$ (g $(\text{L}\cdot\text{día})^{-1}$)	ERR
5	3252	0.2407542	2.27×10^{-3}
10	7591	0.2410867	3.39×10^{-4}
15	15646	0.2411018	4.74×10^{-4}
20	21974	0.2411025	4.94×10^{-4}
30	47498	0.2411035	5.19×10^{-4}
40	61035	0.2411089	5.35×10^{-4}

Considerando cinco dígitos significativos en la función de coste, se puede detectar que a partir de $M = 15$ el número de puntos de la malla de control no tiene ninguna mejora en la función de coste. Además, una verificación numérica de la condición necesaria de optimalidad demostró que las ecuaciones en (8)-(12) son satisfechas con un error de aproximadamente 1×10^{-6} para todos los casos de la Tabla 1. Por otro lado, la Hessiana proyectada es positiva definida con $v_{min} = 0.001$ como el menor valor propio.

La Figura 2 muestra un ejemplo de la estrategia óptima que se propone en este trabajo con y sin optimización. La estrategia sin optimización es la que se aplica actualmente a la planta real. El caudal de medio utilizado actualmente en la planta real consiste en aplicar el caudal de medio en su

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

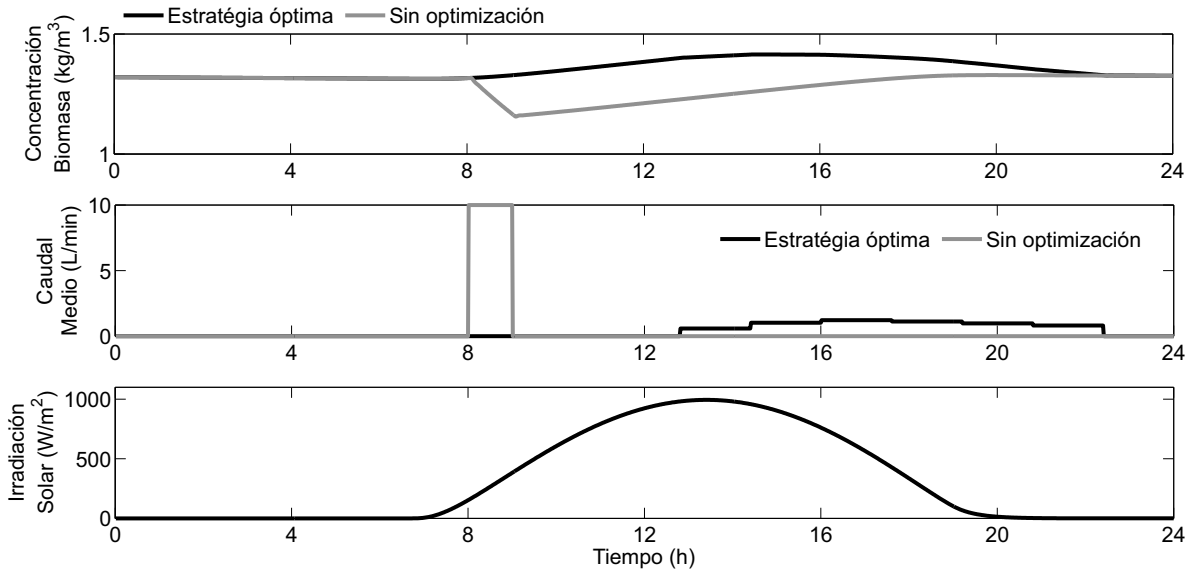


Figura 2: Estrategia óptima aplicada al modelo del fotobiorreactor tubular.

flujo máximo durante aproximadamente una hora. Esto se hace en el periodo 8 : 00 h hasta las 9 : 00 h.

Como se puede observar en la Figura 2, usando la estrategia propuesta, la cosecha de la biomasa ocurre durante el periodo de la tarde hasta que comienza el periodo nocturno. El fotobiorreactor se mantiene cerrado hasta que un nivel suficiente de biomasa es alcanzado. Desde este punto, la biomasa empieza a ser cosechada para mantener la velocidad de crecimiento en su valor máximo. El periodo de cosechado continúa hasta la noche, cuando la concentración de biomasa alcanza el nivel para satisfacer la restricción terminal de igualdad.

Usando el método de optimización propuesto en este trabajo se alcanza una productividad de 0.2411 g(L·día)$^{-1}$ con una tasa de dilución de 0.1745 día^{-1}, es decir, 17.45% del medio ha sido renovado durante el día. Por otro lado, con el caudal de medio sin optimización, se alcanza una productividad de 0.2312 g(L·día)$^{-1}$ y con una tasa de dilución de 0.1911 día^{-1}.

Como se puede observar, la estrategia propuesta en este trabajo dio lugar a un aumento de 4.27% en la productividad del reactor, usando 8.69% a menos de inyección de medio. Nótese que estos resultados son aún más relevantes cuando se extrapolan a nivel industrial con varios fotobiorreactores en serie y con una producción continua durante todo el año. Además, con la estrategia propuesta es posible mantener el cultivo de biomasa operando en el mismo punto de operación, evitando que la densidad del cultivo sea muy alta y que el cultivo sea perjudicado por efecto de la sombra.

Por último, ya que en la práctica siempre existe presencia de incertidumbres entre el modelo y la planta real, se analizó el esquema de optimización propuesto para un análisis de sensibilidad con incertidumbre en la estimación de radiación solar. En este caso se consideró un error de 10% en la irradiancia solar, con el cual se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Análisis de sensibilidad de la irradiancia solar.

Incertidumbre (%)	$\mathscr{J}$ (g (L · día)$^{-1}$)	Φ_M (kg/m^3)
-10	0.2400353	-0.0127
+10	0.2419881	0.0061

Como se puede observar, la incertidumbre de la irradiancia solar tiene una sensibilidad baja en la función de coste y en la restricción terminal.

Los resultados que se muestran en la Tabla 2 sugieren que para un uso práctico de la técnica de optimización propuesta, es necesario establecer una metodología de horizonte deslizante. El problema (6) se resuelve para el intervalo de tiempo $[t_0, t_f]$ y el caudal de medio es entonces aplicado a la planta real. La concentración de biomasa se mide en el instante de tiempo t_f. Obviamente, debido a las perturbaciones que ocurren en el sistema o a dinámicas no modeladas, la restricción terminal $x_{1,M} = x_{1,0}$ no se cumple. Entonces, el valor $e = x^*_{1,M} - x_{1,0}$, donde $x^*_{1,M}$ es el valor real de la concentración de biomasa de la planta, es sumado en la restricción terminal del próximo intervalo de tiempo del problema de optimización. Este pro-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cedimiento asegura que la restricción terminal sea satisfecha en un intervalo de tiempo relativamente grande.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se propone el uso de programación no lineal para resolver el problema de la maximización de la productividad en fotobiorreactores tubulares. Mediante las condiciones necesarias KKT y condiciones suficientes de segunda orden se demostró que la estrategia converge para el valor óptimo. El método numérico propuesto se evaluó a través de simulaciones con el modelo matemático del fotobiorreactor. Comparando los resultados del método propuesto en este trabajo con la tasa de dilución utilizada actualmente en el reactor, se observó claramente un aumento de 4.27% en la productividad.

Como futuros trabajos, la estrategia propuesta se implementará en la instalación real, con el objetivo de aumentar la producción del fotobiorreactor a escala industrial.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los siguientes proyectos: PHB2009-0008 (financiado por el Ministerio Español de Educación, CNPq; CAPES-DGU 220/2010); y DPI2011-27818-C02-01 (financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y los fondos FEDER).

Referencias

[1] Acién, F. G., Fernández, J. M., Maggán, J. J., Molina, E. (2012) Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it, *Biotechnology Advances*, 30, pp 1344-1353.

[2] Bazaraa, M., Sherali, H. D., Shetty, C. M. (2006) Nonlinear programming theory and algorithms, *Wiley-Interscience*, New Jersey.

[3] Becerra-Celis, G., Tebbani, S., Dumur, D., Isambert, A. (2008) Nonlinear predictive control for continuous microalgae cultivation process in a photobioreactor, *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision - ICARCV*. Hanoi, Vietnam.

[4] Becerra-Celis, G., Tebbani, S., Joannis-Cassan, C., Isambert, A., Siguerdidjane, H. (2008) Control strategy for continuous microalgae cultivation process in a photobioreactor, *IEE Multi-conference on Systems and Control*.San Antonio, USA.

[5] Bernard, O. (2010) Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO2 mitigation and biofuel production, *Journal of Process Control*, 21, pp 1378-1389.

[6] Buskens, C., Maurer, H. (2000) SQP-methods for solving optimal control problems with control and state constraints: adjoint variables, sensitivity analysis and real-time control, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 120, pp 85-108.

[7] Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R., Martínez, D., (2012) .Control of Solar Energy Systems. *Springer*, London.

[8] Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, 25, pp 294-306.

[9] Fernández, I., Acién, F. G., Fernández, J. M., Guzmán, J. L., Magán, J. J., Berenguel, M. (2012) Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors, *Bioresource Technology*, 126, pp 172-181.

[10] Grognard, F., Akhmetzhanov, A., Bernard, O. (2014) Optimal strategies for biomass productivity maximization in a photobioreactor using natural light, *Automatica*, 50, pp 358-368.

[11] Polak, E. (1971) Computational methods in optimization, *Academic Press*, New York.

[12] De la Hoz Siegler, H., McCaffrey, W. C., Burrell, R. E., Ben-Zvi, A. (2012) Optimization of microalgal productivity using an adaptive, nonlinear model based strategy, *Bioresource Technology*, 104, pp 537-546.

[13] Suh, I. S., Lee, C. G. (2003) Photobioreactor engineering: design and performance, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 8, pp 313-321.

[14] Toroghi, M. K., Goffaux, G., Perrier, M. (2013) Output feedback passivity-based controller for microalgae cultivation, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 8, pp 313-321.

[15] Wijffels, R. H., Barbosa, M. J (2010) An outlook on microalgal biofuels, *Science*, 329, pp 796-799.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Avances recientes en manipulación subacuática en el subproyecto GRASPER

A. Peñalver, J. J. Fernández, J. Pérez, J. Sales, J. C. García, D. Fornas, R. Marín and P. J. Sanz
Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores
Av. Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana (España)
Universitat Jaume I
{penalvea, fernandj, japerez, salesj, garciaju, dfornas, rmarin, sanzp}@uji.es

Resumen

Este trabajo presenta los últimos avances en la investigación del proyecto GRASPER, que representa uno de los tres subproyectos del proyecto nacional coordinado TRITON. El proyecto TRITON se enmarca en el contexto de investigación en robótica submarina de intervención, y en particular, el subproyecto GRASPER se centra en el desarrollo de las habilidades de manipulación necesarias para ello. Los últimos esfuerzos en el proyecto se centran en aumentar los niveles de autonomía del sistema de manipulación submarina, que consta de un brazo robótico y una pinza multisensorial, así como de las herramientas software necesarias implementadas al efecto.

Palabras clave: Intervención autónoma submarina, simulación 3D, agarre guiado por información multisensorial, mecatrónica de garras robóticas.

1. Introducción

El subproyecto GRASPER forma parte del proyecto TRITON, un proyecto nacional coordinado que involucra a tres universidades: la Universitat Jaume I (UJI), que coordina el proyecto, la Universitat de Girona (UdG) y la Universitat de les Illes Balears (UIB). El objetivo principal del proyecto TRITON es el uso de vehículos submarinos autónomos de intervención (I-AUV) para la ejecución de tareas complejas de intervención submarina. El proyecto TRITON, debido a su complejidad, se subdivide en tres sub-proyectos: (1) *COMAROB*, Robótica Cooperativa, (UdG), (2) *VISUAL2*, Percepción Multisensorial, (UIB), y (3) *GRASPER*, Manipulación Autónoma, (UJI).

TRITON propone dos escenarios como muestra de las capacidades desarrolladas: (1) la búsqueda y recuperación de un objeto de interés (por ejemplo, una caja negra o una ánfora) y (2) la intervención en un panel submarino en el contexto de los observatorios permanentes (apertura/cierre de válvulas, inserción/extracción de conectores).

TRITON se encuentra ahora en su tercer y último año de ejecución, habiendo demostrado recientemente la intervención en un panel submarino tanto en condiciones controladas (cuba y piscina, ver Fig. 1) como en un entorno más realista (puerto de Sant Feliu de Guíxols, Girona, ver Fig. 11).

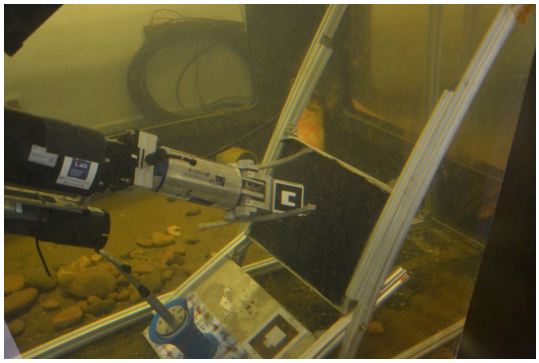


Figura 1: Intervención en condiciones controladas en el tanque de agua disponible en la UJI: apertura y cierre de una válvula.

Por lo que respecta al subproyecto GRASPER, se resumen a continuación las principales líneas de actuación que se han venido desarrollando en los tres últimos años, detallándose en los siguientes apartados junto a los resultados obtenidos recientemente.

En primer lugar, en este subproyecto se han asumido todas las tareas necesarias para el desarrollo de la interfaz de usuario y capacidades de simulación requeridas por TRITON. Así, el punto de partida fue la interfaz de usuario desarrollada durante el proyecto previo RAUVI [1], que ha sido mejorada y ampliada para hacer frente a los nuevos retos abordados en TRITON.

En segundo lugar, se han realizado mejoras en la mecatrónica y en la sensorización para abordar las tareas propuestas en TRITON. A tal efecto, se ha venido trabajando en la construcción de un efector final adecuado para las tareas descritas en esta propuesta (la UJIOne-T, ver Fig. 2). Se trata de una pinza multipropósito que mejora las capacidades de la pinza paralela utilizada en proyectos anteriores, ampliando así el rango de potenciales

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

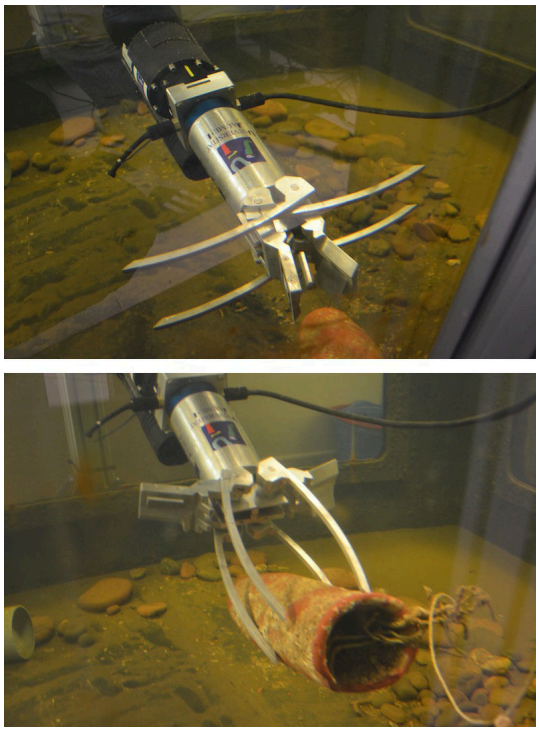


Figura 2: La UJIOne-T: un efector final diseñado para las tareas de intervención descritas en el subproyecto GRASPER.

tareas de intervención a realizar. En la actualidad se está trabajando en la integración de nuevos sensores táctiles en los dedos de la garra, una operación que requiere la adecuada marinización de los mismos.

Por último, una tercera línea de actuación ha consistido en el desarrollo y aplicación de nuevos métodos para manipulación submarina que vayan más allá del estado del arte actual. Para ello, se ha desarrollado un nuevo planificador de agarre haciendo uso de información visual y de rango proporcionada por los sensores montados en el I-AUV. Este planificador incluye una parte que se integra en la interfaz de usuario para asistir al usuario en el problema de la especificación del agarre.

2. Evolución de la intervención en robótica submarina

En el contexto de la intervención submarina enfocada a la manipulación, proyectos anteriores como ALIVE [2] y SAUVIM [3] han representado importantes hitos para la comunidad científica, incrementando de manera significativa la autonomía en las operaciones de intervención, y reduciendo así de manera drástica los costes derivados de la logística en superficie a la que obligan los sistemas teleoperados. Es reconocido por la comunidad científica actual que el problema de la manipulación robótica en general, es uno de los puntos más críticos y a la vez más necesarios a la hora de abordar operaciones cualesquiera de intervención. Y, si este problema que encapsula otros muchos (e.g. actuadores, mecatrónica de las garras/manos, sensores, algoritmos de planificación y control, etc.) dista de estar bien resuelto en el contexto terrestre, debajo del agua y buscando su autonomía se convierte en un auténtico desafío. La tendencia actual es combinar información multisensorial para facilitar de manera autónoma el guiado de las acciones del robot en el agarre y manipulación [4], que ha permitido grandes progresos en el contexto del agarre submarino incrementando su nivel de autonomía, tal como se demostró recientemente en el proyecto europeo TRIDENT (2010-2013) [5]. En la actualidad, es conveniente destacar que el único proyecto en marcha a nivel europeo que aborda el problema de la intervención autónoma submarina en entornos reales como el mar, es el proyecto PANDORA [6].

En lo que a manipulación autónoma se refiere, ya en su momento, en el proyecto RAUVI (2009- 2011) [1], predecesor al TRITON, se desarrolló una novedosa interfaz de usuario con capacidad integrada para planificar agarres autónomos, y también se realizaron satisfactoriamente experimentos de agarres y enganches de objetos. Ya en TRIDENT se demostraron estas capacidades en un entorno real, en el puerto de Sóller (Mallorca), donde el sistema fue capaz de recuperar una maqueta de caja negra del fondo marino (a una profundidad de unos 8 metros) después de que el usuario realizara una especificación del agarre utilizando una interfaz de usuario diseñada al efecto, sin necesidad de analizar previamente el objeto a manipular. Si proyectos anteriores como ALIVE, se centraban en la manipulación de paneles de la industria off-shore, o SAUVIM en la recuperación de objetos, GRASPER tiene como objetivo ir un paso más allá, facilitando a través del proyecto coordinado TRITON, la posibilidad de intervenir indistintamente en cualquiera de estos escenarios, promoviendo así una capacidad autónoma y multipropósito en las operaciones de intervención submarinas.

3. Progresos en estrategias de manipulación

3.1. Especificación del agarre 3D

Tras los buenos resultados obtenidos realizando la especificación del agarre en 2D [7], se han realizado avances en la especificación del agarre utili-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

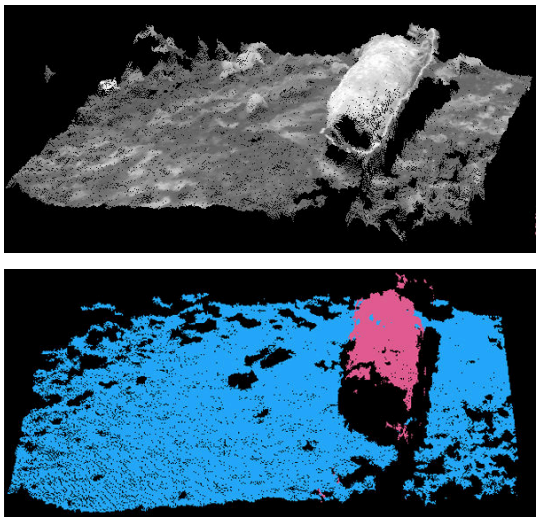


Figura 3: Nube de puntos generada mediante una cámara estéreo Videre (arriba). Segmentación de la escena utilizando un umbral de 5 cm (abajo).

zando información 3D [8]. Las técnicas de visión y segmentación desarrolladas permiten mejorar la especificación del agarre, que había sido realizada previamente por un usuario en 2D sobre una imagen e información 3D, de forma que se aprovecha toda la información disponible. En este caso, se simplifica el problema suponiendo que el objeto a agarrar no es completamente desconocido. En concreto, los objetos pueden tener una estructura cilíndrica.

Se han utilizado diferentes fuentes de información 3D para obtener el modelo del objeto: reconstrucción mediante segmentación de un haz láser y visión estéreo. Estos medios permiten obtener una nube de puntos del entorno del robot. Además, se han probado tanto con nubes de puntos obtenidas en el simulador como nubes de puntos obtenidas en condiciones experimentales, por lo que la aproximación implementada demuestra ser flexible ante la entrada sensorial y puede ser reforzada utilizando múltiples entradas.

Con esta información 3D se utiliza el algoritmo RANSAC [9] (RANdom SAmple Consensus, un método de segmentación utilizado para estimar los parámetros de un modelo matemático, en este caso ajustando primero el modelo de un plano y en segunda instancia el de un cilindro) para segmentar el fondo marino del objeto considerándolo plano con un cierto margen. Después, se utiliza nuevamente el algoritmo RANSAC para detectar un objeto cilíndrico en el conjunto de puntos que no son considerados como fondo plano. El resultado de este proceso se puede ver en la Fig. 3. Unos puntos corresponden al plano, otros al cilindro y otros quedan descartados. Aunque el objeto no sea totalmente cilíndrico, el disponer de un área cilíndrica permite definir un agarre sobre él.

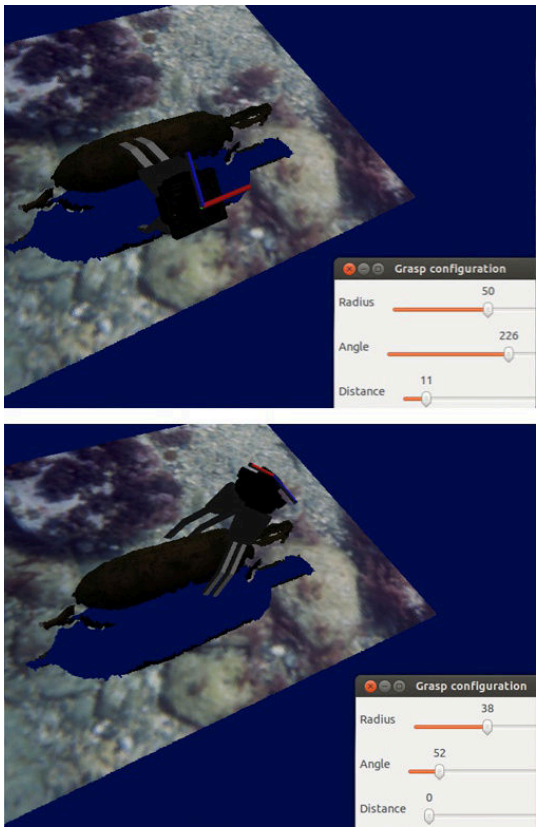


Figura 4: Interfaz para la especificación del agarre en el que se muestran dos tipos: agarre lateral (arriba) y agarre frontal (abajo).

El resultado de este algoritmo es una descripción paramétrica del objeto. Con esta descripción, se puede generar una posición de agarre en función de la distancia al cilindro, el ángulo de agarre y el tipo de agarre (lateral o frontal, Fig. 4). De esta forma, se genera un abanico de posibilidades que se pueden filtrar de forma autónoma, mediante restricciones geométricas, o de forma manual a través de una interfaz de usuario. Esta segunda opción ofrece la posibilidad al usuario de decidir si un agarre es correcto o no. Así, se aumenta la robustez del sistema sin que éste sea complejo de utilizar como en el caso de los ROVs.

Tras estos pasos, se puede proceder a la planificación del movimiento del manipulador a la posición calculada y la ejecución de las trayectorias obtenidas.

3.2. Planificación del agarre 3D

Una vez que el objeto que se desea manipular ha sido detectado, con el fin de alcanzar correctamen-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

te la posición de manipulación, se definen unas posiciones de referencia o *waypoints* respecto al objeto, por las que el manipulador debe pasar (ver Fig. 5). Para alcanzar cada una de estas posiciones, el sistema calcula la distancia cartesiana entre el manipulador y dicha posición de referencia, y utilizando velocidades cartesianas, el manipulador trata de alcanzarla. Debido a que el brazo utilizado, el Light-Weight ARM5E [10], tiene tan solo cuatro grados de libertad, no se imponen restricciones de orientación para alcanzar cada una de estas posiciones de referencia.

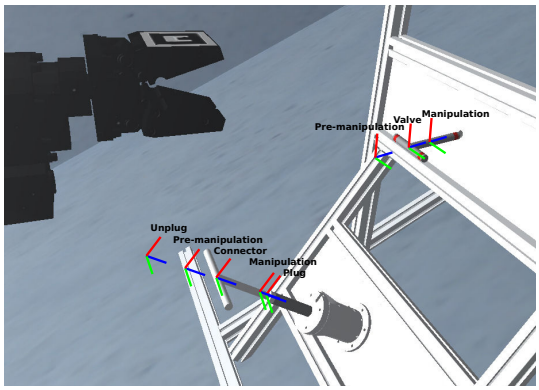


Figura 5: Posiciones de referencia o *waypoints* respecto al objeto por las que el manipulador debe pasar.

3.3. Control por realimentación visual

Para poder controlar, de forma autónoma, la posicion y orientacion del manipulador del brazo robótico Ligth-Weight ARM5E con respecto a su base, se ha desarrollado un nuevo algoritmo de control por realimentación visual. Este algoritmo actualiza el valor de cada una de las articulaciones del brazo robótico, utilizando la detección, mediante una cámara, de un marcador o *marker* (un patrón que un algoritmo de visión es capaz de reconocer y seguir), situado en una posición conocida del brazo. Usando este método, se pueden evitar algunos errores debidos a la mala inicialización del brazo o a la pérdida de calibración de las articulaciones. Además, el proceso de calibración de la posición y orientación de la cámara respecto de la base del brazo, no es necesario. Los diferentes pasos de este algoritmo se pueden observar en la Fig. 6. Durante la inicialización, se obtiene la relación existente entre la cámara y la base del brazo. Una vez inicializado, tras cada detección del marcador, se obtiene la diferencia entre los valores de las articulaciones proporcionados por el controlador del brazo, y los valores reales que deberían tener para conseguir que el marcador se encuentre donde ha sido detectado (compensación articulaciones). A partir de la primera detección, cada vez que el controlador le ha de proporcionar el valor de las articulaciones al usuario, éstos se ven modificados, añadiéndoles los valores de compensación.

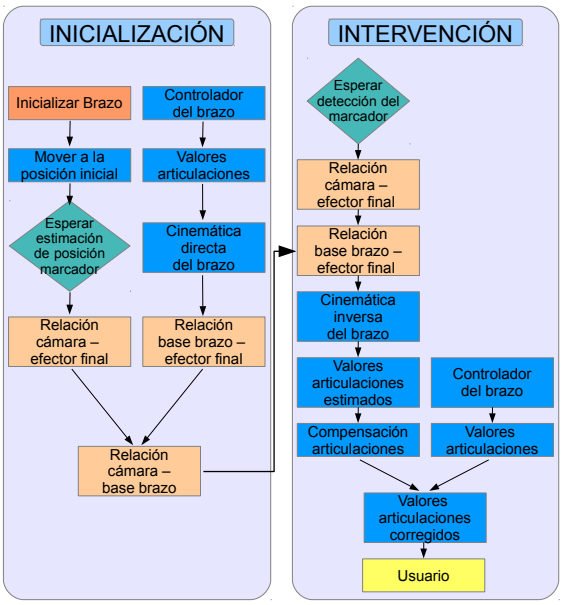


Figura 6: Diagrama de flujo del algoritmo de control por realimentación visual.

4. Progresos en mecatrónica: la nueva UJIOne-T

Con el objetivo de poder abordar los dos escenarios propuestos en TRITON, se ha evolucionado la pinza UJIOne [11] inicialmente desarrollada en GRASPER. El diseño original de la UJIOne fue concebido para el agarre de objetos de tamaño medio (por ejemplo, una caja negra) mediante unas garras largas y curvadas, fruto de las sinergias existentes en aquel momento con el proyecto activo TRIDENT. La nueva versión, la UJIOne-T, mantiene las mismas características que su predecesora pero incorporando como novedad dos "palmas" que permiten el uso y manipulación de herramientas con empuñadura en forma de T, como las normalmente presentes en los paneles de intervención submarinos. Dichas "palmas" han sido diseñadas para el guiado, durante la fase de agarre, de la herramienta a manipular mediante unas "lenguetas" y para su firme sujeción, durante la fase de manipulación, a través de unas ranuras en forma de T. Además, su tamaño y forma permiten la ubicación de un *marker* para facilitar el control de la UJIOne-T mediante realimentación visual. El paso de la configuración para el agarre de objetos a la configuración de manipulación de herramientas en T se produce abriendo o ce-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

rrando respectivamente la UJIOne-T (ver Figs. 1 y 2), gracias a que su diseño le permite cruzar sus garras. Este diseño le confiere a la UJIOne-T un carácter multipropósito conforme a las expectativas previstas en GRASPER.

5. Progresos en simulación

En cuanto a la simulación, se han realizado progresos en el motor físico del simulador UWSim (UnderWater Simulator) [12], y se han implementado nuevos sensores que permiten un mayor realismo y versatilidad del simulador, destacando entre ellos el sensor de fuerza-par.

5.1. Nuevo sensor fuerza-par

Este sensor de fuerza-par es aplicable a cualquier parte del vehículo utilizando su volumen de colisión *(collision shape)* como sensor de fuerza-par aplicada sobre él. Esta fuerza se calcula respecto al centro de masas definido en la configuración del sensor. El funcionamiento de este sensor se basa en la simulación de colisiones del motor de física Bullet [13]. Se utiliza la reacción esperada de una colisión en el motor de física para calcular la fuerza que se debería haber aplicado a la pieza en cuestión para llegar desde la posición inicial a la final calculada por el motor de física. Para probar que el sensor funciona correctamente, basta con mover la pieza del vehículo donde se encuentra el sensor de fuerza por un lugar sin colisiones y comprobar que la fuerza de colisión obtenida es 0. Una vez comprobado esto, puede verse que al colisionar, el volumen de colisión al que hemos aplicado el sensor de fuerza, devuelve valores de fuerza en un rango aceptable. Véase un ejemplo de salida del sensor en la parte superior de la Fig. 7.

5.2. Mejora de dinámica de colisiones

Además, este sensor de fuerza ha sido utilizado con éxito como entrada al módulo de dinámica del vehículo. Hasta ahora, el módulo de dinámica del vehículo tan solo tenía en cuenta las fuerzas propias del vehículo en el agua para simular sus movimientos en ella. Por tanto, los vehículos no tenían en cuenta el entorno a la hora de moverse por la escena simulada. Ahora puede utilizarse un sensor de fuerza aplicado sobre el volumen de colisión del vehículo completo, y añadir esta fuerza al modelo dinámico del vehículo como fuerza externa aplicada sobre él. Esto nos permite obtener una reacción realista de las colisiones de los vehículos bajo el agua (ver Fig. 7 abajo) y, por tanto, simulaciones de situaciones en las que el vehículo interacciona con el entorno como pueden ser operaciones de *docking* y *undocking*.

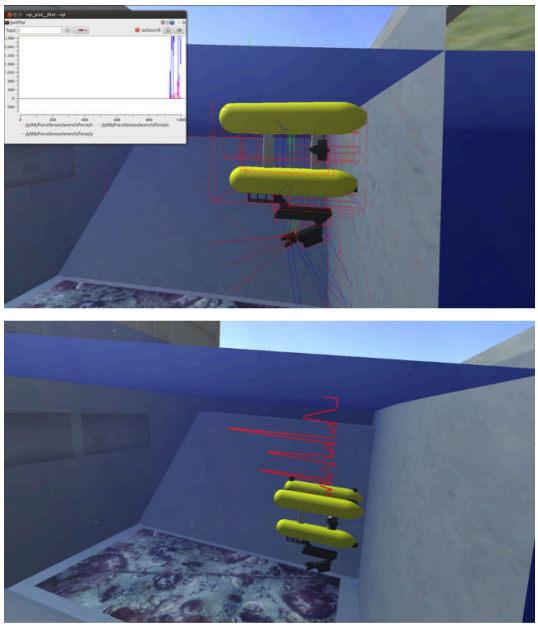


Figura 7: Simulación en UWSim donde se muestra la salida del sensor de fuerza aplicado sobre el vehículo al chocar contra una pared (arriba) y la trayectoria del vehículo al colisionar en repetidas ocasiones contra la pared utilizando el sensor de fuerza como entrada a la dinámica del vehículo (abajo).

6. Avances en HMI (Human Machine Interaction)

Los avances en la interfaz de usuario, se dividen en dos: la mejora de las capacidades inmersivas y las mejoras en el control multimodal. A fin de conseguir este propósito, no sólo se están desarrollando dichas mejoras, sino que se está construyendo una capa de abstracción que permita la conexión de distintos dispositivos de inmersión o control, de forma totalmente transparente tanto para el usuario como para el simulador, o el robot real en caso de tener conexión directa (ver Fig. 8).

Sin lugar a dudas, el uso de un dispositivo de inmersión (Head-mounted Display, HMD) como puede ser OculusRift, mejora sustancialmente la integración del usuario y la percepción del mismo en un entorno simulado. Para ello, se pretende mejorar la experiencia 3D que proporciona el simulador, añadiendo nuevos estímulos sensoriales (auditivos, hápticos, vibración, etc.).

Por otra parte, las mejoras de control multimodal se centran en los distintos modos con los que el usuario podrá interactuar con el simulador. Un ejemplo de control es el desarrollo de una interfaz con la que el usuario pueda guiar el robot por la escena simulada o mover los *Interactive markers*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 8: Idea de concepto: un usuario controla los *interactive markers* utilizando el dispositivo Leap-Motion para especificar el agarre. El dispositivo de inmersión Oculus Rift VR proporciona al usuario una inmersión completa en el entorno de simulación 3D.

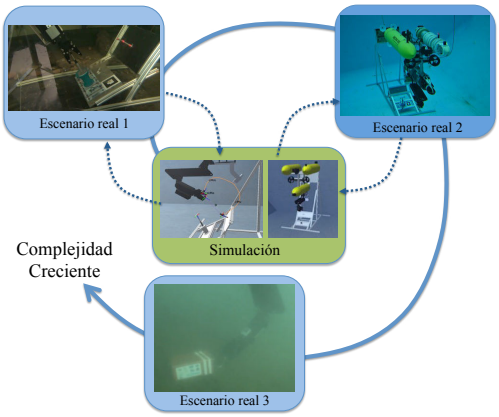


Figura 9: Los cuatro *testbeds* diseñados para el *roadmap* experimental se instancian para una misión de intervención específica (intervención en un panel).

para especificar el agarre en 3D, usando los movimientos de su mano [14]. Un *interactive marker* es un marcador que se puede aplicar a un objeto en una escena 3D y permite al usuario interactuar con ella. Para ello, se están explorando diversos dispositivos, siendo el LeapMotion uno de los más fiables para realizar el seguimiento y captura de gestos de la mano del usuario.

7. Resultados experimentales

7.1. Metodología para la validación experimental

De la experiencia acumulada a través de anteriores proyectos tales como RAUVI o TRIDENT, se ha

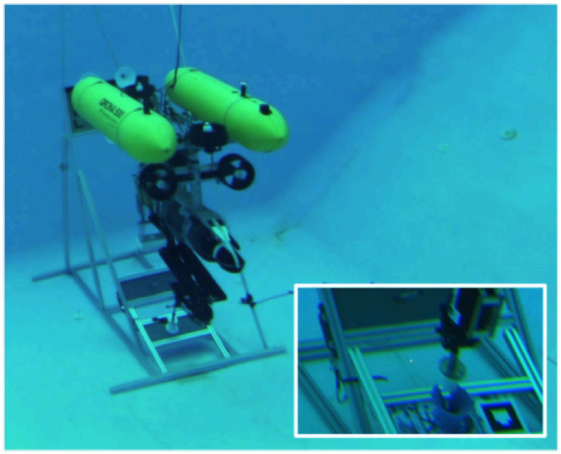


Figura 10: Pruebas realizadas el pasado mes de noviembre de 2013 en el CIRS (UdG). Se puede observar el sistema completo haciendo *docking* en un panel de intervención submarino conectando y desconectando un conector *hot-stab*.

desarrollado una metodología para la validación experimental, que es independiente del contexto específico de intervención a llevar a cabo bajo el agua. Esta metodología consiste en el uso del simulador UWSim, como paso previo antes de pasar a cualquiera de los *testbeds* utilizados para la validación experimental. La fiabilidad y viabilidad de esta metodología ha sido demostrada recientemente en misiones de intervención en condiciones reales en el mar. Así por ejemplo, en la Fig. 9, se pueden ver los cuatro pasos básicos diseñados en el *roadmap* experimental, en el que se crean instancias para una misión de intervención específica, en este caso, la intervención en un panel.

7.2. Escenario real 1: cuba de agua

Siguiendo la metodología experimental utilizada, después de realizar una primera validación de los diferentes algoritmos en simulación, realizamos una primera comprobación de los mismos sobre *hardware* y escenarios reales. Para ello, cada subsistema real es probado en las instalaciones del desarrollador del mismo, adoptando una aproximación *hardware in the loop* (HIL) en el que los subsistemas *hardware* no disponibles se simulan mediante el simulador UWSim.

En GRASPER, el primer escenario real considerado es el tanque de agua disponible en las instalaciones del IRSLab en la Universitat Jaume I de Castellón. Para abordar el escenario de intervención sobre un panel submarino contemplado en TRITON, se hizo una réplica del panel desarrollado por la UdG para tal propósito pero incluyendo únicamente los elementos del panel a manipular

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

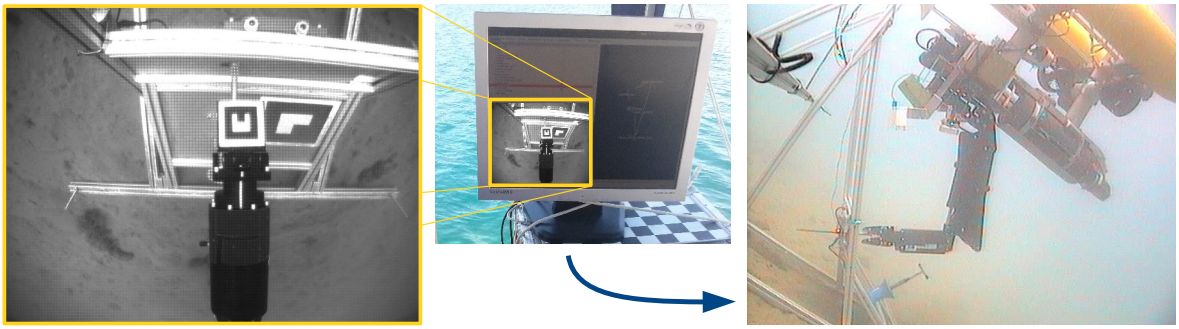


Figura 11: Intervención en condiciones realistas el pasado mes de mayo en el puerto de Sant Feliu de Guíxols, Girona. (Izquierda y Centro) Vista desde el monitor fuera del agua. Se muestra el brazo en el momento previo a la manipulación de la válvula en el panel. (Derecha) Vista de la intervención desde dentro del agua. La imagen ha sido tomada desde una cámara lateral instalada en el panel. La vista aparece ligeramente girada a la derecha debido a una incorrecta orientación de la cámara.

(válvula, conector y *markers*). El sistema de *docking* del I-AUV del panel se reemplazó por una fijación manual y permanente del brazo sobre la estructura. Las cámaras del sistema de visión fueron reemplazadas por unas equivalentes aunque se utilizaron los mismos algoritmos de visión desarrollados por la UIB para la manipulación. En la Fig. 1 se puede observar la ejecución satisfactoria de las intervenciones en modo autónomo sobre la válvula en el escenario descrito, haciendo uso de la metodología y algoritmos comentados en el apartado de mejora de los algoritmos basados en visión para el control del brazo (sección 3.3).

7.3. Escenario real 2: integración en el CIRS (UdG)

El siguiente paso en el *roadmap* experimental, después de probados cada subsistema de forma independiente en escenarios reales, es la integración de todos los subsistemas y su validación en un escenario real, equivalente al que se habían probado por separado. En TRITON, dicho escenario corresponde a las instalaciones que el CIRS (Centro de Investigación en Robótica Submarina) dispone en la UdG. La principal infraestructura de dichas instalaciones es una piscina de 8m(ancho) x 16m(largo) x 5m(profundidad), que dispone de unos laboratorios bajo el nivel del agua con ventanas a la piscina desde los cuales se puede observar la evolución de los experimentos. Además, dispone de un puente-grúa sobre la piscina que permite introducir y recuperar el I-AUV de la piscina.

En dichas instalaciones, el pasado mes de noviembre se llevó a cabo con éxito la integración del subproyecto GRASPER con el resto de subproyectos en el contexto del proyecto TRITON. El experimento consistió en lo siguiente (ver Fig. 10): el I-AUV realizó el *docking* de forma autónoma sobre el panel de intervención utilizando para ello el guiado por visión desarrollado por la UdG. A continuación, el algoritmo de detección de la UIB detectó de forma automática por visión la posición de los objetos a manipular (válvula y conector) con la ayuda del *marker* del panel. Una vez detectados, el algoritmo de manipulación guió autónomamente el brazo y se giró la válvula en ambos sentidos simulando su apertura y su cierre. Seguidamente, el sistema de manipulación agarró y desconectó el conector también de forma autónoma. Luego, el I-AUV realizó el *undocking* del panel y se situó en una posición alejada del mismo para posteriormente repetir nuevamente el *docking*. Finalizado el segundo *docking*, se produjo una nueva detección de los elementos de manipulación, tras la cual, el sistema de manipulación conectó de forma exitosa el conector extraído previamente, todo ello de forma autónoma. El experimento finalizó haciendo de nuevo un *undocking* del I-AUV.

7.4. Escenario real 3: pruebas en el mar

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el proyecto TRITON se encuentra ahora en su tercer y último año de ejecución, habiendo demostrado recientemente la intervención en un panel submarino en un entorno real y complejo como es el mar. Estos experimentos tuvieron lugar el pasado mes de mayo en el puerto de Sant Feliu de Guíxols, Girona (ver Fig. 11). Dichos experimentos consistieron en repetir los mismos realizados anteriormente en las instalaciones del CIRS pero añadiendo una fase inicial de localización acústica del panel por parte de la UdG. Aunque los experimentos se replicaron con éxito gracias a la metodología experimental utilizada, se pudo constatar de nuevo el incremento de la complejidad que supone el paso de un entorno controlado como una piscina a uno no controlado como el mar.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

8. Conclusiones

En este artículo se ha descrito el estado actual de los experimentos realizados por el equipo de la UJI dentro del subproyecto GRASPER. Los experimentos se han centrado en la manipulación autónoma de una válvula y un conector instalados en un panel de intervención submarina, simulando los utilizados en la industria *off-shore*. El artículo presenta el método de experimentación, siguiendo fases de diseño mecatrónico, simulación con técnicas de HIL *(Hardware in the loop)* e interacción avanzada, reconocimiento 3D de escenas, así como determinación y ejecución del agarre. Los experimentos han sido realizados tanto en laboratorio como en el mar, y han sido satisfactorios. El trabajo futuro se centrará en la mejora de las técnicas de agarre, concretamente cuando las condiciones del mar debido a falta de visibilidad y corrientes dificultan el uso de sensores de visión.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, DPI2011-27977-C03 (proyecto TRITON) y por la Universitat Jaume I, proyecto PI·1B2011-17 y por las becas predoctorales PREDOC/2012/47 y PREDOC/2013/46.

Referencias

[1] P. J. Sanz, M. Prats, P. Ridao, D. Ribas, G. Oliver, and A. Orti, "Recent progress in the RAUVI project. A reconfigurable Autonomous Underwater Vehicle for Intervention," in *52-th International Symphosium ELMAR-2010*, Zadar, Croatia, September 2010, pp. 471–474.

[2] J. Evans, P. Redmond, C. Plakas, K. Hamilton, and D. Lane, "Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation," in *OCEANS 2003. Proceedings*, vol. 4, Sept 2003, pp. 2201–2210.

[3] G. Marani, S. K. Choi, and J. Yuh, "Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 15–23, 2009.

[4] M. Prats, A. P. del Pobil, and P. J. Sanz, *Robot physical interaction through the combination of vision, tactile and force feedback. Applications to assistive robotics*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 84. Springer Publishing Company, Incorporated, 2013.

[5] P. J. Sanz, P. Ridao, G. Oliver, G. Casalino, Y. Petillot, C. Silvestre, C. Melchiorri, and A. Turetta, "TRIDENT: An european project targeted to increase the autonomy levels for underwater intervention missions," in *OCEANS'13 MTS/IEEE conference. Proceedings*, San Diego, CA, 2013.

[6] FP7-PANDORA, "Persistent Autonomy through learNing, aDaptation, Observation and Re-plAnning (PANDORA)," http://persistentautonomy.com/.

[7] M. Prats, J. Fernández, and P. Sanz, "Combining template tracking and laser peak detection for 3D reconstruction and grasping in underwater environments," in *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pp. 106–112.

[8] D. Fornas, A. Peñalver, M. Prats, J. J. Fernández, and J. Sales, "Primitive shape fitting in point clouds for enabling autonomous underwater grasping," in *Fifth International Workshop on Marine Technology (MARTECH'13)*, Girona, Spain, Oct 2013, pp. 85–88.

[9] R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein, "Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection," *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, Jun. 2007.

[10] J. Fernández, M. Prats, P. Sanz, J. García, R. Marín, M. Robinson, D. Ribas, and P. Ridao, "Grasping for the seabed: Developing a new underwater robot arm for shallow-water intervention," *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol. 20, no. 4, pp. 121–130, 2013.

[11] P. J. Sanz, J. J. Fernández, J. Pérez, A. Peñalver, J. C. García, D. Fornas, J. Sales, J. Bernabé, and R. Marín, "GRASPER: Un Proyecto Dirigido a Incrementar la Autonomía de la Manipulación Submarina," in *XXXIV Jornadas de Automática*, Terrassa, Barcelona, 2013.

[12] M. Prats, J. Pérez, J. Fernández, and P. Sanz, "An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, 2012, pp. 2577–2582.

[13] E. Coumans, "Bullet physics library (2009)," Available online: http://bulletphysics.org/.

[14] J. C. García, A. Peñalver, M. Prats, and P. J. Sanz, "Recent progress in HRI for underwater robotic intervention," in *Workshop on Human Robot Interaction (HRI), IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'13)*, Karlsruhe, Germany, May 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Printbots: un gran paso hacia adelante

Leopoldo Armesto, Andrés Conejero, Miguel Fernández, Pedro Fuentes-Durá, David Perry, Enrique Martínez, Vicente Marhuenda, Carles Igual, Carlos de la Fuente, Oihan Elesgaray
Universitat Politècnica de València
C/Camino de Vera s/n, 46022, Valencia (España)
e-mail: larmesto@idf.upv.es

Resumen

Este artículo presenta el resultado de varios proyectos académicos (trabajos de fin de grado y proyectos final de carrera) de alumnos de la Universitat Politècnica de València relacionados con robots imprimibles (o printbots*). Este tipo de actividades ha supuesto la realización de proyectos con resultados muy vistosos a muy bajo coste. Además, cada robot, permite actividades diversas que van desde el diseño de piezas, electrónica, control, simulación, lo que las hace idóneas para este propósito pero también para actividades de investigación. Concretamente el artículo muestra los resultados del diseño, montaje, impresión, programación de un robot hexápodo, un brazo robot (extendido a manipulador móvil), un robot con ruedas, un robot humanoide y un quadrotor, abarcando así un gran espectro de aplicaciones.*

Palabras clave: Printbot, Robot, Educación, Impresión 3D.

1. Introducción

La conexión global a las redes de información está permitiendo el intercambio de información a nivel horizontal, logrando el acercamiento de la tecnología a usuarios "no expertos" de una manera hasta ahora desconocida. Gracias al acceso a Internet está proliferando una manera diferente de entender la protección de las creaciones, llamada *Open Source* o software libre, que permite el intercambio global de la información, y lo que es más importante, su continua mejora. Esta situación se lleva dando en el ámbito del desarrollo de software desde los inicios de las computadoras personales, pero desde la democratización del acceso a Internet se ha venido exportando a otras áreas [13]. La exportación de la cultura del software libre a estas nuevas áreas se ha acentuado desde mediados de la última década. Por un lado, encontramos lo que ya se denomina "Open Hardware" [2], y que consiste en el acceso libre a planos de construcción de objetos físicos para ser reproducidos y mejorados. Uno de los principales caso de éxito que se ha dado en el ámbito de la electrónica de microcontroladores es el sistema Arduino [11] que permite de una manera sencilla y económica desarrollar proyectos que requieran interacción con el medio físico. En este ámbito podemos encontrar también el proyecto RepRap [12] cuyo objetivo es el de crear máquinas que sean capaces de replicarse a sí mismas y que ha contribuido significativamente al uso de las impresoras 3D "de escritorio". Este fenómeno, junto a la democratización del uso de otras tecnologías de fabricación digital ha sido acuñada por varios autores como "la tercera revolución industrial" [8].

Una de las consecuencias de la impresión 3D es que la Comunidad Robótica tiene la oportunidad de alcanzar a un público mucho más amplio. En este sentido, la impresión 3D es una tecnología relativamente incipiente que está teniendo un impacto importante en el campo de la robótica. Actualmente, es relativamente sencillo el proceso de descargar gran variedad de modelos de robots imprimibles, también conocidos como *printbots* que pueden ser utilizados en investigación y diversas actividades académicas con propósito no comercial. Estos robots son mucho más que simples juguetes y pueden ser utilizados en múltiples formas como herramientas para los estudios de ingeniería. Pueden ser incorporados en cursos de robótica convencional y en proyectos. También pueden ser utilizados para mejorar y amplicar el conocimiento y puesta en práctica de los fundamentos de la robótica, mejora y adaptación de desarrollos existentes (ya sea del diseño mecánico, modificación de la electrónica, capacidad de diseñar controladores avanzados para mejorar la estabilidad en robots caminantes o en UAVs (vehículos aéreos no tripulados por su terminología en inglés). Además, los *printbots* permiten generar proyectos ambiciosos que pueden ser llevados a cabo por grupos de estudiantes que, debidamente coordinados, pueden trabajar de forma complementaria en diferentes actividades multidisciplinares.

Este artículo explora alguno de los usos de robots imprimibles de bajo coste para la enseñanza y difusión de la robótica en estudios universitarios. En primer lugar, describimos un proyecto académico llevado a cabo por estudiantes de un curso de innovación educativa conocido por EPS (European Project Semester) en el que los estudiantes han

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

impreso, montado, rediseñado y programado un robot hexápodo. Este robot ha sido utilizado en diversos proyectos académicos con el propósito de hacer caminar el robot hexápodo. En segundo lugar, se describen los resultados en relación a la impresión y montaje de un brazo robot que ha sido posteriormente extendido con una base móvil. En tercer lugar, se describe el diseño de un robot móvil de muy bajo coste con sensores para aplicaciones típicas de las competiciones robóticas. También describimos un proyecto que ha implicado la impresión un robot humanoide y un quadricóptero.

Todos estos proyectos han sido desarrollados íntegramente durante el curso académico 2013-2014 e incluso algunos son proyectos todavía no finalizados. Nuestro objetivo es mostrar los beneficios potenciales que tienen este tipo de actividades en la Educación. Confiamos en que el artículo pueda servir como base para un debate y que las ideas y prácticas expresadas en este artículo puedan ser consideradas como plausibles en el ámbito de la robótica. Es posible, por supuesto, que ciertos aspectos no puedan todavía integrarse plenamente en cursos académicos regulares, pero nuestra percepción, como académicos y estudiantes, es que los robots educacionales llegarán a nuestros hogares, colegios y universidades en breve. La principal ventaja ofrecida por este tipo de actividades es la motivación del estudiante que aplica herramientas y procedimientos de robótica en sus proyectos con resultados inmediatos. Con la adaptación apropiada de un programa, este tipo de actividad puede también llevarse acabo en colegios e institutos.

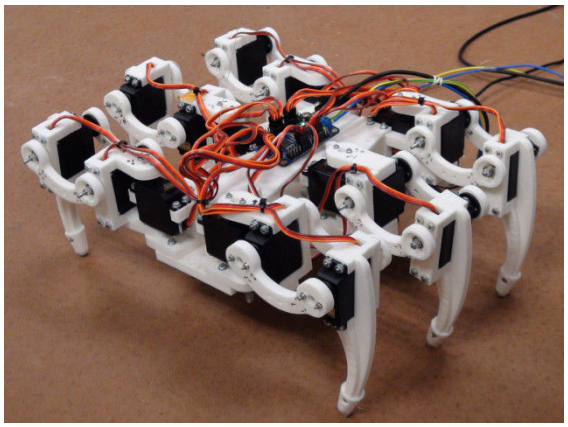
2. Robot Hexápodo

En esta sección describimos algunos de los trabajos realizados con el robot HF08 [9] mostrado en la Figura 1. Se trata de un robot imprimible 3D cuyas piezas originales están disponibles para descargar de forma gratuita. Más concretamente, describimos la labor llevada a cabo por un grupo de estudiantes ERASMUS multidisciplinar cuya labor fue la de crear una empresa ficticia que comercializa robots impresos 3D. También describimos en esta sección los desarrollos de dos estudiantes de Grado que utilizaron el robot HF08 como plataforma para la experimentación y desarrollo de modos de caminar con diferentes aproximaciones.

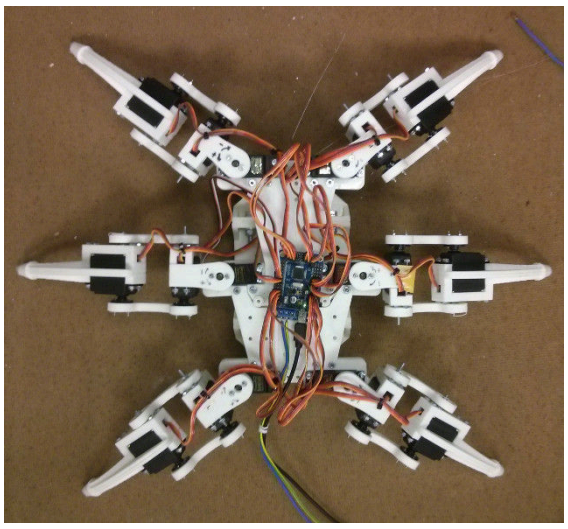
El robot HF08 fue escogido por un grupo multidisciplinar de estudiantes de intercambio dentro del marco de un módulo innovador llamado EPS (por su denominación en inglés, European Project Semester). Este módulo se lleva a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València y, a diferencia de la mayoría de los cursos regulares, está basado en la metodología POL (Project Organized Learning) e incluye seminarios para el desarrollo de habilidades, competencias y aptitudes para resolver un problema dado en un contexto realista.

Es bien conocido que la metodología POL persigue el pensamiento crítico y creativo y permite adquirir habilidades necesarias para el autoaprendizaje, comunicación y habilidades prácticas. En este sentido, los proyectos de robots estimulan las características anteriormente mencionadas. La participación de los estudiantes en grupos organizados, permite desarrollar la creatividad y la resolución de problemas de forma conjunta. La motivación que supone un planteamiento realista de un proyecto robótico para estudiantes que no han tenido previamente contacto con la robótica sirve como elemento vehicular de problemas de Ingeniería [10].

Cada vez es más importante aprender aspectos in-



(a)



(b)

Figura 1: Robot HF08

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

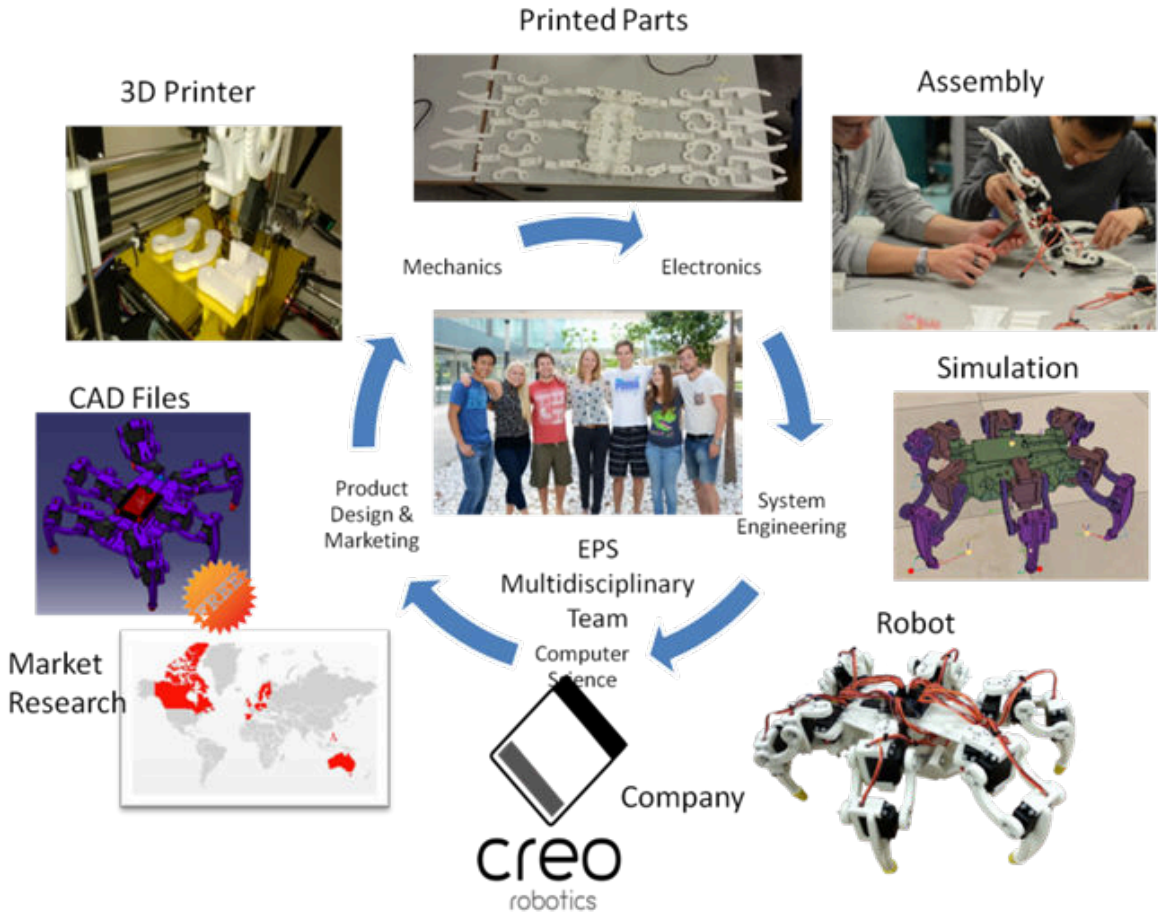


Figura 2: Flujo de trabajo del equipo multidisciplinar del EPS.

terdisciplinares. Encontrar el marco de proyectos adecuados no es una tarea sencilla, además requiere recursos humanos, financieros y materiales [6] que, desafortunadamente, son cada vez más limitados. La naturaleza de proyectos robóticos desarrollados prácticamente desde la base, permite integrar disciplinas como mecánica, electrónica, informática y control. Gracias a la robótica, los estudiantes reciben una realimentación fuerte, incluso visceral, y divertida experimentando con su propio trabajo. Hay un amplio espacio para los estudiantes para explorar diferentes aproximaciones, realizar hipótesis, entender cómo funcionan las cosas y llevar a cabo experimentos para validar sus creencias y asumpciones [14]. Además, como parte de la formación del estudiante, no debe olvidarse el hecho de que deben generar informes, memorias y documentación diversa de índole técnico que son vitales para soportar el aprendizaje global.

En el curso EPS, los equipos son intencionadamente multidisciplinares, con objeto de enriquecer y fomentar la colaboración cooperativa entre ellos. En este caso, el equipo consistió en un grupo de siete estudiantes de diferentes nacionalidades y con diferentes campos de estudio como: Ingeniería mecánica, Diseño industrial, Ingeniería eléctrica/electrónica, etc. Su tarea consistió en crear una compañía ficticia que comercializaba robots impresos de bajo coste y el desarrollo de herramientas software asociadas a los robots (ver Figura 2). Debido al carácter multidisciplinar del proyecto el grupo definió, según sus propios intereses, un conjunto de subtareas que incluían un estudio de mercado, diseño, o mejor dicho, rediseño de algunas piezas, montaje de la impresora (modelo Prusa I3), impresión y ensamblaje de piezas, selección de materiales para la electrónica de control y simulación del robot para estudiar diferentes modos de caminar. La creación de un logo y vídeos promocionales de la compañía ficticia fueron parte de las actividades llevadas a cabo.

En el proceso del estudio del mercado, los estudiantes decidieron que el primer robot que comercializaría su compañía ficticia sería un robot hexápodo. Dado que no tenían experiencia previa en el diseño de robots y el tiempo limitado que disponían para el desarrollo del proyecto, escogieron el robot Hellium Frog [9] como punto de parti-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

da. Para alcanzar esta decisión tuvieron que mirar qué tipos de robots impresos podrían fabricar considerando aspectos tales como la complejidad de las piezas, documentación disponible, beneficio esperado de su posible comercialización, audiencia a la cual estaría dirigido, etc.

Las piezas del robot fueron impresas en material plástico ABS basándose en los ficheros CAD originales, con adaptaciones de las mismas para poder reubicar servos con mayor par, ya que los del diseño original eran prácticamente insuficientes para soportar su propio peso (incluso sin baterías). El robot fue ensamblado, las patas calibradas y la locomoción de cada una de las patas fue individualmente calibrada. El robot utiliza cojinetes en las articulaciones que permiten un mejor giro de las propias articulaciones, lo que hace que tenga una buena relación calidad/coste, teniendo un coste total, incluyendo la electrónica de control de los servos, por debajo de 500 €.

Además, los estudiantes utilizaron V-REP para simular el robot, incorporando en la capa visual, los mismos ficheros CAD que habían utilizado para imprimir. Esto les permitió poder generar un modo de caminar regular (tres patas apoyan mientras otras tres avanzan) de forma muy sencilla. Con objeto de poder validar sus resultados, conectaron el simulador V-REP con la electrónica del robot hexápodo para que, en bucle abierto, reproduciera los movimientos determinados por la simulación, teniendo en consideración elementos tradicionales de la robótica como son articulaciones, eslabones, trayectorias, cinemática inversa, dinámica, etc., lo cual les supuso un refuerzo importante en su aprendizaje. La conexión entre el simulador y la electrónica del robot se hace a través de un plugin que es capaz controlar los 18 servos del robot mediante el envío de un comando serie. Los resultados son impresionantes teniendo en consideración las pocas líneas de código que tuvieron que ser programadas por los alumnos.

Tras la validación del robot, otros dos alumnos aprovecharon estos resultados para realizar su TFG. Uno de los alumnos se centró en el control remoto del robot hexápodo utilizando electrónica basada en Arduino, para lo cual implementó la cinemática inversa del robot, así como la generación de trayectorias mediante la interpolación de puntos de control. El control del robot se hace mediante la pulsación de teclas en un ordenador o mediante una aplicación móvil basada en ROS para dispositivos Android, que permite el envío de comandos de movimientos remotos. En el otro TFG, el desarrollo consistió en analizar las capacidades del paquete *moveit!* de ROS sobre robots caminantes, con el objeto de poder resolver el problema de planificación de movimientos. Desafortunadamente, *moveit!* resultó ser bastante ineficiente para este propósito, ya que el control sobre las articulaciones era demasiado lento e inadecuado, por estar diseñado para cadenas cinemáticas abiertas como brazos articulados. Por este motivo, se decidió desarrollar un nodo ROS para el control del robot, que a través de una sencilla interfaz basada en el paquete *dynamic-reconfigure*, permite establecer el paso de avance y la altura a las cuales se elevan las patas con la cinemática inversa obtenida de forma analítica.

Dentro de las actividades futuras previstas para este robot podemos encontrar la modificación de los servos para acceder al potenciómetro y así poder implementar un control en lazo cerrado que implica el uso de un microcontrolador con capacidad de manejar todas las señales y capacidad de procesamiento suficiente para cerrar el lazo, implementar la cinemática inversa y gestionar las comunicaciones con dispositivos externos. En total son 18 señales PWM a controlar y 18 analógicas, además de incorporar un acelerómetro en los 3 ejes. En este sentido, un alumno ha iniciado su TFG en esta dirección, basándose en el microcontrolador STM32F407. Desde un punto de vista de investigación, la plataforma quiere ser utilizada para desarrollar técnicas de Reinforcement Learning [3] con el objeto de enseñar al robot a caminar en el marco de una tesina de Máster que está siendo desarrollada en la actualidad por un alumno utilizando herramientas de simulación.

3. Brazo Robótico

El brazo robótico de [1] es un brazo articulado con 8 servos, de los cuales 2 son complementarios para garantizar el giro completo de la base, girando hasta 180° cada uno y otro de ellos es para el cierre de la pinza, con lo que en realidad tiene 6 DOFs y una pinza motorizada. El diseño de este brazo robot incorpora una muñeca articulada, lo que hace fácil resolver su cinemática inversa de forma analítica. Se trata de un robot consecuencia de un PFC de la Universidad Carlos III Madrid de Antonio Castro. Este robot ha sido utilizado en este curso académico en diferentes actividades que a continuación se describen.

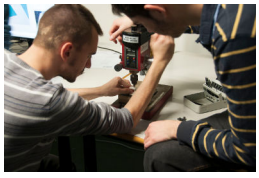
En primer lugar, el robot fue impreso por alumnos de la asignatura Robótica del Grado de Ingeniería Mecánica de la Universitat Politècnica de València como parte de un trabajo de la asignatura. Los alumnos de este curso no tienen experiencia previa con la robótica con lo que el montaje y uso de un brazo robot por ellos mismos les ayuda a entender los aspectos más básicos como por ejemplo el concepto de articulaciones y eslabones de una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

forma mucho más pragmática. Los grupos están formados por 4 o 5 alumnos en los que deben coordinarse para imprimir las diferentes piezas de un robot, formando un total de 5 grupos por robot. En total se imprimieron dos robots entre todos los alumnos del curso que acabaron montando y probando en una sesión conjunta, tal y como se aprecia en la Figura 3. Durante esta sesión de montaje, los alumnos debían mejorar el acabado de las piezas para que la tornillería encajara sin problemas (principalmente debía taladrar algunos orificios) y coordinarse con alumnos de otros grupos de piezas adyacentes de forma que todas encajen entre sí. Un responsable de cada grupo se encargó del montaje final de las piezas de las cuales eran responsables. Adicionalmente, los alumnos realizaron un conjunto de prácticas y trabajos asociadas a este robot mediante simulación con V-REP, con objeto de reforzar los conceptos teóricos explicados en la asignatura sin perder de vista la perspectiva práctica y pragmática. Otra aproximación para planificar los movimientos del brazo robótico es utilizar el paquete *moveit!* de ROS para aplicaciones del tipo *pick and place*.

A diferencia del robot hexápodo, la mecánica de este brazo robot es notoriamente más endeble y la capacidad de poder manipular objetos bastante limitada. La ventaja principal es que se trata de un robot muy económico y cuyo coste en motores y electrónica es aproximadamente 120 €.

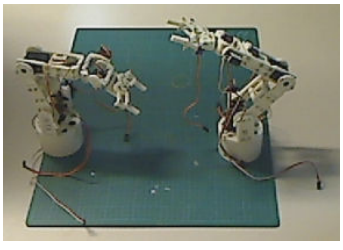
Dos alumnos han impreso otro brazo robótico al que le han extendido sus capacidades incorporándolo sobre una base móvil con ruedas, tal y como se muestra en la Figura 4. Los trabajos han consistido en el diseño e impresión de la base y de la electrónica de los motores. También han desarrollado el software de programación del Arduino Mini utilizado en la electrónica para tal propósito. El manipulador móvil se puede controlar a través de un plugin de V-REP, mediante un cable USB.



(a) Taladrado

(b) Equipo 1

(c) Equipo 2



(d) Resultado Final

Figura 3: Taladrado y ensamblado de dos brazos robots.

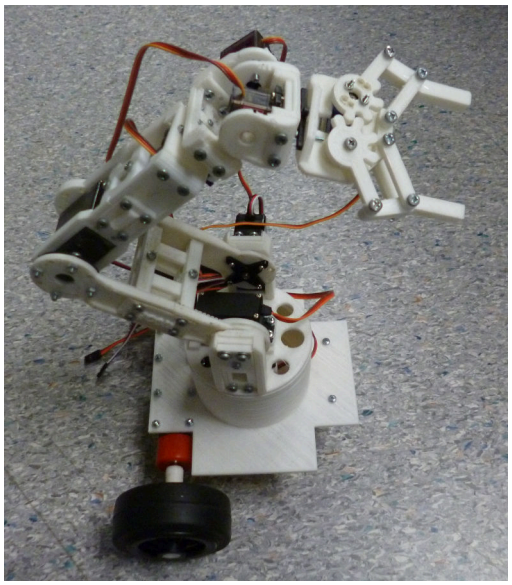


Figura 4: Robot manipulador móvil.

4. Robot Móvil con Ruedas

En una asignatura del Grado de Ingeniería de Electrónica y Automática de la Escuela de Diseño de la Universitat Politècnica de València y otra asignatura de Libre Elección de la Escuela de Ingenieros Industriales de la misma universidad, ambas asignaturas con el nombre Robótica Móvil se ha utilizado la tecnología de la impresión 3D. En estas asignaturas, los alumnos han desarrollado un trabajo que consistía en imprimir las piezas del robot Miniskybot 2 [5]. Se trata de un robot

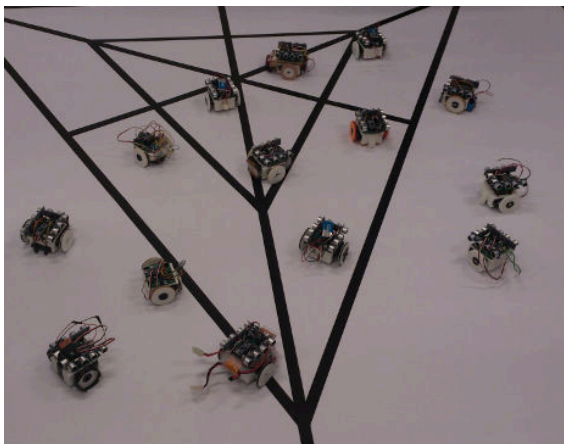
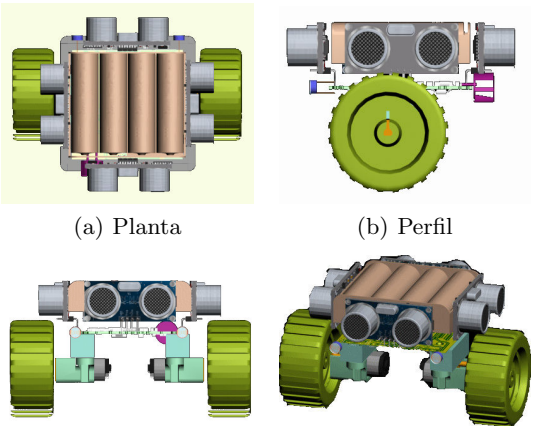


Figura 5: Robots Miniskybot2 impresos en la asignatura de Robótica Móvil.

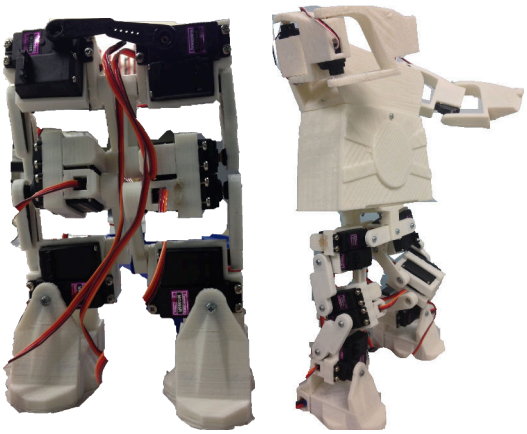
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Planta (b) Perfil

(c) Alzado (d) Perspectiva

Figura 6: Nueva versión de robot móvil.



(a) Piernas robot ROFI (b) Robot Humanoide

Figura 7: Diseño de un Robot humanoide con 18 DOFs.

con ruedas de bajo coste cuyo diseño original incorpora un sensor de ultrasonidos de forma opcional. Dado que las capacidades del robot no son suficientes para los propósitos de la asignatura, se rediseñó la electrónica y se añadieron hasta 5 sensores de ultrasonido y dos sensores de infrarrojos, todo ello basado en el Arduino Nano. Esto permitió a los alumnos desarrollar aplicaciones típicas como seguidores de línea, evitación de obstáculos, seguimiento de paredes, etc. Entre las dos asignaturas se llegaron a imprimir hasta 30 robots con un coste por debajo de 50 € por robot (ver Figura 5 como muestra de 14 de ellos utilizados en una de las asignaturas).

Además, los alumnos realizan un conjunto de actividades basadas en la simulación de este robot en V-REP (incorporando sensores adicionales como cámaras). En este sentido, los alumnos desarrollan un gran abanico de implementaciones prácticas que abarcan desde el control cinemático, seguidores de línea, evitación de obstáculos, comportamientos tipo bicho, planificación de movimientos, etc. Este tipo de actividades refuerza su conocimiento de la robótica a la vez que les permiten resolver un problema similar cuando trabajan con el robot real.

Para el próximo curso académico se está diseñando una nueva versión de robot (ver Figura 6) con una electrónica capaz de incorporar comunicación bluetooth, 4 sensores ultrasonidos, 2 sensores infrarrojos, 2 sensores de luz, 1 sensor de contacto, 1 micrófono y 2 micromotores basado en el Arduino Nano. Esto permitirá a los alumnos realizar un conjunto de aplicaciones más amplio, así como dotar de comunicación inalámbrica. La nueva versión del robot será un poco más cara, en torno a 80 €, pero sigue siendo muy accesible tanto para Departamentos, Colegios o Centros como para los propios alumnos.

5. Robot Humanoide

El robot ROFI (RObot FIve) [4] es un robot bípedo imprimible 3D, con cabeza, pero sin cuerpo ni brazos. El robot está compuesto por 12 servomotores, 6 para cada pierna y por su diseño dispone de cadera, rodilla y tobillo, si bien los 4 servos de la rodilla son coplanares y trabajan como 2 únicos servos. Aún así, es posible establecer modos de caminar de forma sencilla, cuya estrategia consiste en elevar el pie haciendo un movimiento esférico, utilizando el servo de la cadera y los servos de la rodilla y adaptando la orientación del pie con el servo del tobillo.

Este robot fue escogido por ser uno de los pocos robots imprimibles bípedos con un diseño cuyas piezas son fácilmente imprimibles, dispone de documentación adecuada y con un tamaño pequeño-mediano. Por su diseño, las baterías de los servos de las piernas están justo en los pies del robot, con lo que el peso que soportan es significativamente menor. Las piernas del robot se imprimieron en plástico PLA (Figura 7(a)) y se ensamblaron utilizando cojinetes y tornillería estándar. Al igual que el robot hexápodo, la relación calidad/coste también es buena, ya que el coste total de los motores, mecánica y electrónica está por debajo de 400 €.

Con objeto de extender las capacidades del robot original, se ha diseñado un cuerpo y unos brazos con 3 articulaciones cada uno, tal y como se muestra en la Figura 7(b), estando todavía la cabeza pendiente de rediseñar. Este trabajo está siendo desarrollado por un alumno como parte de su TFG, mientras que otro está simulando el robot para determinar diferentes modos de caminar basándose en el simulador V-REP. El propósito del cuerpo es poder albergar la electrónica de control

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 8: Diseño de un quadricóptero.

e incluso un PC embebido basado en la tarjeta Odroid-U3, con capacidad de procesamiento para cámaras USB que se ubicarían en la cabeza. La electrónica de bajo nivel prevista para controlar el robot es la misma que la del robot hexápodo, ya que ambos requieren una cantidad de señales similares.

6. Robot Aéreo No Tripulado

De forma similar al curso EPS, existe en el segundo semestre un curso denominado EIM (European Industrial Management). Este curso implementa la misma metodología POL que el EPS, de forma que un grupo de estudiantes multidisciplinares y de nacionalidades distintas, se coordinan con un propósito común.

En este sentido se formó un grupo con 3 estudiantes cuyo propósito fue la impresión del Quadrotor Hummingbird II [7], adaptación del mismo y testeo del robot, cuyo resultado se muestra en la Figura 8. Las tareas de los alumnos consistieron en la búsqueda del mercado, selección de componentes, impresión 3D, ensamblaje, conexionado y realización de pruebas. También desarrollaron actividades de diseño de elementos de protección de las hélices, así como de una plataforma de soporte para la realización de pruebas. El coste de este robot de de unos 500 €, ya que la electrónica es sensiblemente más cara que la utilizada en los robots anteriores. Además requiere módulos de radio-frecuencia para la transmisión inalámbrica por desde un puerto USB con objeto de ser controlado por un ordenador y motores con potencia suficiente para elevar el robot.

Como consecuencia de algunas dificultades técnicas y humanas, los objetivos del proyecto no fueron alcanzados al 100 %, en parte porque los conocimientos de electrónica y automática no eran adecuados y encontraron algunas dificultades técnicas en entender cómo funcionaba la electrónica escogida o solventar problemas asociados a la misma. Aún así, el resultado obtenido está siendo aprovechado por un alumno, para la realización de su TFG, cubriendo aspectos de la comunicación entre el robot y un PC, planificación de trayectorias, integración de sensores, que no pudieron ser abarcados en la actividad previa del EIM.

6.1. Lo que opinan nuestros estudiantes

Tras la finalización de las asignaturas, los estudiantes participaron en una encuesta en relación al grado de satisfacción y motivación recibido como consecuencia del uso de robots impresos. Nuestro objetivo es valorar cómo esta metodología ha supuesto un conjunto de experiencias que les han ayudado a entender la robótica y mejorar sus habilidades como ingenieros. Hasta el momento, 36 alumnos han completado la encuesta respondiendo a las siguientes cuestiones:

- P1: ¿Está usted satisfecho con la asignatura/actividad?
- P2: ¿Considera relevantes para su futuro los contenidos de la asignatura/actividad?
- P3: ¿Considera que ha aumentado su interés por la robótica?
- P4: ¿Considera usted que ha desarrollado sus habilidades como ingeniero?

Los alumnos han respondido con una escala cualitativa: “Nada”, “Poco”, “Normal”, “Mucho” y “Muchísimo”.

La Figura 9 muestra el resultado de cada pregunta. Se puede claramente apreciar que “Mucho” es la respuesta más seleccionada por los alumnos a excepción de la pregunta P2, que al presuntar sobre la relevancia de la actividad para su futuro respondieron de forma mayoritaria la opción “Normal”. En términos generales, esta pequeña encuesta indica que los estudiantes se siente muy motivados hacia el uso de este tipo de tecnologías y que el uso de robots imprimibles ha mejorado sus habilidades como ingeniero. Los resultados de la pregunta P2 se deben, probablemente, a la escasa industria robótica en España y a la dificultad actual que tienen muchos estudiantes para encontrar puestos de trabajo. Bajo estas circumstancias, parece perfectamente razonable que los estudiantes respondieran “Normal” como respuesta mayoritaria.

7. Conclusiones

En este artículo, hemos descrito una gran cantidad de ejemplos de robots impresos 3D o *printbots* que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

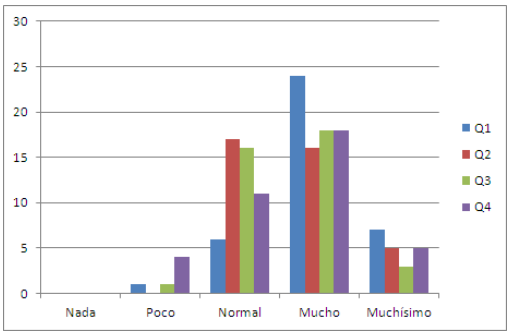


Figura 9: Encuesta realizada a 36 estudiantes.

han sido incorporados tanto para la realización de proyectos como en los propios cursos de ingeniería. Por el tipo de actividad realizada, se ha demostrado que ha sido altamente estimulante y motivadora. En términos generales podemos decir que los robots imprimibles ofrecen una excelente oportunidad para difundir la robótica en múltiples disciplinas y facilitar la adquisición de conocimiento en su aplicación de resolución de problemas reales. Algunos de los beneficios encontrados, de forma más específica son:

- Promoción para el desarrollo de habilidades, competencias y actitudes para resolver un problema o un cojunto de problemas en un contexto realístico.
- Proporcionar a los estudiantes experiencias en la comprensión e implementación de los principios de la robótica.
- Refuerzo del entendimiento.
- Mejora de habilidades de aprendizaje.
- Enriquecimiento del trabajo en equipo.
- Hacer conscientes a los estudiantes de la importancia y necesidad de escribir informes técnicos que puedan ser aprovechados por otros estudiantes o ingenieros.

Además, los estudiantes:

- relacionan la práctica y el trabajo escrito
- adquieren experiencia con problemas reales
- mejoran la confianza en sí mismos
- están más motivados
- obtienen altos grados de satisfacción
- encuentran más fácil la integración entre lo que han aprendido a los problemas reales.

Se ha mostrado que las ideas presentadas en este artículo son aplicables en el contexto de metodologías alternativas para la Educación de la Robótica. Las ideas y métodos descritos en el artículo pueden ser adaptados a otros programas de otras Universidades así como a programas de otros niveles de Educación. En nuestra opinión, dada la gran disponibilidad de robots impresos 3D y plataformas de código y hardware abierto, la Comunidad Robótica tiene la oportunidad de dar un gran paso hacia adelante.

Referencias

[1] A. Castro. Robotic arm with 6 dof, 2012. `http://www.thingiverse.com/thing:30163`.

[2] S. Davidson. Open-source hardware. *IEEE Design & Test of Computers*, 21(5):456–, 2004.

[3] M. P. Deisenroth, G. Neumann, and J. Peters. A survey on policy search for robotics. *Foundations and Trends in Robotics*, 2(1-2):1–142, 2013.

[4] J. Dowdall. Rofi robot five, 2012. `http://www.projectbiped.com/prototypes/rofi`.

[5] J. González, A. Barrientos, A. Prieto-Moreno, and M. A. de Frutos. Miniskybot 2, 2012. `http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Miniskybot_2`.

[6] E. Heinrich, M. Bhattacharya, and R. Rayudu. Preparation for lifelong learning using portfolios. *European J. Engineering Education*, (32):653–663, 2007.

[7] J. Krassman. Quadcopter hummingbird ii, 2013. `http://www.thingiverse.com/thing:167721`.

[8] P. Markillie. *A Third Industrial Revolution: Special Report Manufacturing and Innovation*. The economist. Economist Newspaper, 2012.

[9] M. Price. Hf08 hexapod robot, 2012. `http://www.heliumfrog.com/hf08robot/hf08blog.html`.

[10] K. Rawat and G. Massiha. A hands-on laboratory based approach to undergraduate robotics education. In *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1370–1374, 2004.

[11] M. Schmidt. *Arduino*. Pragmatic Bookshelf, 2011.

[12] E. Sells, Z. Smith, S. Bailard, A. Bowyer, and V. Olliver. RepRap: the replicating rapid prototyper-maximizing customizability by breeding the means of production. *Handbook of Research in Mass Customization and Personalization*, 1:568–580, 2009.

[13] E. von Hippel. Innovation by User Communities: Learning from Open-Source Software. *MIT Sloan Management Review*, 42(4):82+.

[14] J. Weinberg and X. Yu. Robotics in education: Low-cost platforms for teaching integrated systems. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 10(2):4–6, June 2003.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

TRANSFERENCIA DE COMPORTAMIENTOS DE NAVEGACIÓN HUMANA A UN PLANIFICADOR LOCAL DE ROBOTS

Rafael Ramón-Vigo, Noé Pérez-Higueras, Luis Merino
Universidad Pablo de Olavide, Crta. Utrera km 1, E-41013, Sevilla, España, rramvig@upo.es, noeperez@upo.es, lmercab@upo.es
Fernando Caballero
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, fcaballero@us.es

Resumen

La proliferación de robots en entornos compartidos con personas está generando importantes desafíos. Entre ellos, destacan la navegación social y la manera en que las personas perciben a los robots. En este artículo, analizamos la técnica de inverse reinforcement learning *como herramienta para transferir el comportamiento típico de navegación entre personas a un planificador local de navegación de robots. Se han empleado observaciones reales de movimiento relativo entre humanos, disponibles en un dataset público y se presenta un análisis del rendimiento del comportamiento del controlador en dos escenarios diferentes de interacción con personas, además de una comparación de esta aproximación con el método basado en proxémica.*

Palabras clave: Aprendizaje, Función de Costes, Inverse Reinforcement Learning, Proxémica.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es parte del proyecto FP7 Fun Robotic Outdoor Guide (FROG)[1]. Su propósito es hacer uso de un guía robot en lugares turísticos. A pesar de que los robots guías se han venido desarrollando desde hace más de una década [17, 15], el proyecto considera como nuevas contribuciones el desarrollo de comportamientos sociales y de una personalidad seductora del robot integrando para ello la realimentación social, así como una robusta operación en escenarios muy concurridos. El proyecto pretende demostrar la operación del robot en el Zoo de la ciudad de Lisboa y en el Real Alcázar de Sevilla (ver Fig. 1). Comportarse en estos escenarios no sólo conlleva asegurar una navegación eficiente y segura con respecto a las personas, sino también comprender y respetar las distintas interacciones sociales y la percepción humana del robot cuando el mismo está ejecutando sus tareas.

En escenarios que requieren la interacción con personas, estas consideraciones se deben tener en cuenta en toda la arquitectura del robot, desde la planificación de la tarea [2], supervisión y ejecución de la tarea [4] y la planificación y ejecución del camino [16, 18, 19]. Centrándose en el particular caso de la pila de navegación, los planificadores actuales se usan típicamente para determinar un camino que minimice el tiempo o la distancia recorrida, lo cual no se traduce generalmente en un camino que cumpla con los requerimientos sociales. Por ello se determinarán unos costes para velar su cumplimiento. Algunos autores [16, 9] han incluido costes y restricciones relacionadas con la percepción de las personas en los planificadores para obtener caminos aceptadamente sociales. Estos comportamientos sociales pre establecidos en el código pueden ser inapropiados [5]. Muchos se derivan de los teoría de costes de proxémica [10], pero como se comenta en [12], esta se centra en escenarios donde las personas interactúan entre ellas (sin movimiento) y podría no ser apropiado para la navegación.

Así pues, puede entenderse como una buena aproximación el aprender estos costes a partir de observaciones de la tarea. En los últimos años, se han presentado numerosas contribuciones en esta dirección: la técnica de aprendizaje supervisado se usa en [19] para aprender apropiadamente modelos de predicción en el movimiento de las personas que tengan en cuenta la interacción robot-humano cuando se navega en escenarios concurridos. Por otra parte, el aprendizaje sin supervisión es utilizado en Luber et al. [12] para determinar una serie de prototipos de movimiento que cumplen una normativa social observada en los propios datos. Estos prototipos son utilizados para inferir los costes sociales que se utilizarán para la planificación de caminos. En [6], se utiliza un modelo basado en componer una fuerza (vector) social que modifique el comportamiento del robot para tener en cuenta precisamente a las personas que lo rodean.

Una aproximación adicional es el aprendizaje mediante demostración [3]: un experto indica al robot cómo debería navegar entre humanos. Una manera de implementar esto es mediante la técnica de *inverse reinforcement learning* [1], en la cual una función de recompensa (o coste) es extraída del

[1] http://www.frogrobot.eu

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 1: El proyecto FROG pretende desarrollar un guía robótico con una personalidad seductora, considerando la realimentación social, en el Real Alcázar de Sevilla y el Zoo de Lisboa. Arriba, una situación típica en uno de los escenarios.

comportamiento del experto, para luego ser usada en la obtención de la correspondiente política que debe ejecutar el robot.

En [8], se presenta un planificador de caminos basado en *inverse reinforcement learning*. Como el planificador se propone a partir de trayectorias ejemplo que conllevan interacción, también es consciente de algunos comportamientos sociales típicos. Sin embargo, mientras que en [8] los costes se usan para la planificación de caminos, en [14] los autores emplean dichas técnicas para aprender políticas locales de ejecución y así control directo del robot. Este modo de proceder puede combinarse con otras técnicas de planificación a niveles más altos.

En este trabajo, se describe un minucioso análisis del aprendizaje empleado, así como de los datos usados para ello. Dos conjuntos de datos de personas en movimiento en diferentes escenarios se han empleado para aprender las funciones de coste. Estudiamos la generalización de las funciones de coste obtenidas comparando el comportamiento aprendido en un escenario cuando se aplican en el otro. También exploramos si la combinación de ambos sets de datos mejoran el comportamiento general. Además, proponemos un modelo con un simple conjunto de indicadores sobre los que depende la función de recompensa, y analizamos y comparamos esta aproximación con una función de costes basada en la proxémica. Ésta última se centra en el estudio de las distancias socialmente aceptadas que se establecen en las interacciones entre personas, pero en circunstancias estáticas [7].

El artículo se estructura de la siguiente forma: en la próxima sección se describe la aproximación seguida para el aprendizaje de los costes sociales. A continuación, se ocupa de la evaluación de la generalización de la función de costes y la comparación con el método basado en proxémica. Finalmente, se proponen las conclusiones y las líneas futuras.

2. APRENDIENDO LA FUNCIÓN DE COSTES SOCIALES

El aprendizaje de la función de costes se acomete utilizando la técnica *inverse reinforcement learning* (IRL), [1, 8]). Esta técnica, IRL, asume que el comportamiento de un experto del cual queremos aprender puede ser modelado mediante un Proceso de Decisión de Markov (MDP). Formalmente, un MDP (discreto) se define por la tupla $\langle S, A, T, R, D, \gamma \rangle$, donde $s \in S$ es el conjunto finito de posibles estados y $a \in A$ es el conjunto finito de posibles acciones. En cada paso, para cada acción elegida se devuelve una recompensa (o coste). Después de ejecutar una acción a, se llega a un estado cuya transición es modelada por la probabilidad de transición $T(s', a, s) = p(s'|a, s)$. Así pues, en cada instante de tiempo o paso, se observa el estado resultante. La recompensa obtenida en cada paso se denota como $R(s, a)$. Una política es una función $a = \pi(s)$ que mapea los estados posibles a acciones determinadas. Por otra parte, una política que maximice la suma de las recompensas esperadas, o *valor*, conseguidas durante D intervalos temporales $E[\sum_{t=0}^{D} \gamma^t R(s, a)]$ se denomina política *óptima*. Para asegurar la convergencia cuando $D \to \infty$, las recompensas están escaladas por un factor de descuento $\gamma \in [0, 1)$. El objetivo del IRL es determinar la función de recompensa $R(s, a)$ que el experto está siguiendo de manera implícita observando las acciones que está ejecutando para llevar a cabo la tarea, asumiendo que sigue una política de acuerdo a un determinado MDP. En muchos casos la función de recompensa puede depender de un conjunto de indicadores $\theta(s)$, que son función del estado.

2.1. Modelo

El aspecto más relevante de esta aproximación es definir un modelo MDP, y en particular, el estado y los indicadores de los cuáles se considera que depende la función de recompensa. Esto constituye la principal hipótesis considerada en este trabajo.

En principio, las acciones de una persona que se encuentra desplazándose con respecto a otras personas dependerán del estado que configuran las personas que tiene cerca, además de otros factores, como pueden ser obstáculos y el destino al cuál se dirige. Sin embargo considerar todas las personas cercanas conduciría a un espacio de estados muy grande (además de tener un tamaño variante en función del tiempo). En [8], se aborda este echo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

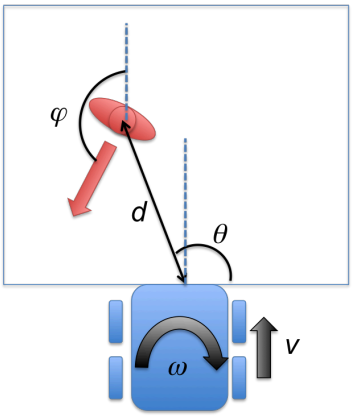


Figura 2: Configuración del espacio de estados y de acciones.

considerando la densidad y el flujo en la dirección como indicadores, para después usarlos en el nivel de planificación de caminos.

Aquí, el modelo considera la generación de controles de velocidad para el vehículo (robot). Al contrario que en [8], parametrizamos el estado en el marco de referencia local del robot para reducir la complejidad del problema. Además, en el modelo se consideran solamente relaciones de movimiento entre dos personas (el robot o experto y la persona más cercana). El estado se define así como la posición relativa y la orientación de la persona con respeto al robot, codificado como $s = \begin{pmatrix} d & \theta & \varphi \end{pmatrix}^T$ (ver Fig. 2).

Como la parametrización es local, la pose del robot no está considerada dentro del espacio de estados, resultando en una mejor cobertura con los datos de entrenamiento y en una mejor generalización para entornos que hayan cambiado. Del mismo modo, como estamos considerando un planificador local de navegación, no se requiere tener las distribuciones de probabilidad a priori de ocupación del mapa global, tal como sí ocurre en [8], donde se buscan los caminos globales.

Los efectos de las acciones sobre el estado se modelan usando simplemente las ecuaciones cinemáticas del movimiento, y se consideran deterministas. Las incertidumbres se introducen en el movimiento de las personas que navegan alrededor, haciendo un muestreo de algunas variaciones en las velocidades para determinar su posición futura. De este modo, queda determinada la función de transición $T(s', a, s)$.

Una hipótesis que será analizada en este artículo es si el modelo puede ser extrapolado a casos con más de una persona mediante la media de la función de costes aprendida aplicada a todas las personas presentes en la escena.

Figura 3: Imágenes de ejemplo del set de datos de BIWI Walking Pedestrian usado para el aprendizaje [13]. Izquierda: entrada al hotel. Derecha: edificio ETH.

3. Sets de datos y entrenamientos

3.1. Sets de datos

Como fuente de ejemplos, se ha utilizado el set de datos The BIWI Walking Pedestrians dataset[2] [13] (ver Fig. 3). Consiste en una vista aérea de dos escenarios urbanos en exteriores:

- El primer escenario propuesto (DS1) es una acera muy transitada cercana a la entrada a un hotel en Zurich (ver Fig. 3, izquierda).
- El segundo (DS2), en el mismo set de datos, es una vista aérea de la entrada del edificio principal de ETH, también en Zurich (ver Fig. 3, derecha).

En ambos escenarios, las posiciones y velocidades de todas las personas y sus correspondientes marcas de tiempo fueron manualmente extraídas y anotadas.

En el primero de los escenarios, las personas están caminando a lo largo de la acera cruzándose con gente que viene en la dirección contraria, resultando en dos flujos diferenciados de entrada/salida de personas en ambos lados de la imagen. Por el contrario, en el segundo set de datos, el flujo de personas puede aparecer en cualquier lugar de la parte superior de la imagen y convergen en un estrecho pasillo.

3.2. Entrenamientos

Para resolver el problema de aprendizaje inverso (IRL), se considerará el algoritmo Gaussian Process IRL (GPIRL) [11]. La principal diferencia con respecto a otras aproximaciones IRL es que emplea un Gaussian Process para aprender una función de recompensa no lineal sobre el espacio de indicadores. De esta manera, el GP permite extrapolar la función de recompensa obtenida hacia otros espacios de estados.

[2] http://www.vision.ee.ethz.ch/datasets/

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En nuestro caso, algunas de las personas son seleccionadas como expertos entre todas las que se están moviendo en el set de datos. Para cada punto de la trayectoria que está siguiendo dicho experto extraemos:

- El estado $s_i = \begin{pmatrix} d & \theta & \varphi \end{pmatrix}^T$ configurado con la persona más cercana dentro de la zona de planificación local. Este escenario local (ver Fig. 2) está definido como la región usada en la planificación local del robot, y está definida como una región rectangular de 4x4 metros (4 metros en frente y 2 metros a cada lado del robot).
- La acción ejecutada por el agente experto en el mismo instante de tiempo, consistente en las velocidades lineales y angulares $a_i = \begin{pmatrix} v & \omega \end{pmatrix}^T$.

Cuando la persona más cercana abandona la región de planificación local, la trayectoria $\{s_i, a_i\}_{i=1}^N$ se almacena como un episodio para la fase posterior de entrenamiento. Para la siguiente persona, se crea un nuevo episodio. Para obtener experimentos con la misma duración temporal, el número de intervalos se iguala para cada episodio, dividiéndolos en varios si es necesario.

De cada set de datos, únicamente aquellos peatones que se estén moviendo y que al menos tengan a una persona en el interior de su región de planificación local durante 6 intervalos de tiempo son elegidos como expertos. Como queremos aprender la tarea de evitar a las personas, es necesario que exista al menos un peatón en dicho espacio durante todo el tiempo que dura el episodio de entrenamiento. Este valor de 6 para el número de intervalos temporales ha sido afinado manualmente para conseguir un buen balance entre el horizonte temporal de los entrenamientos (parámetro utilizado en la resolución de la política del MDP) y el número de entrenamientos que se consiguen cumpliendo las condiciones antes descritas.

Además, imponemos que esos peatones tengan que moverse al menos 2 metros desde su punto de partida. Esto se corresponde con un filtro heurístico para asegurar que los peatones seleccionados como expertos se están moviendo realmente y no es simplemente que están de pie en el mismo sitio, como podría ser esperando al autobús o a alguien, o quizá viendo algún escaparate. Ambas condiciones nos permitirán centrarnos sobre los peatones que realmente están haciendo navegación social. Como resultado, se obtiene un conjunto de entrenamientos por cada set de datos. Uno de ellos se corresponde con 103 episodios de 51 personas diferentes, y el otro con 47 episodios de 28 personas

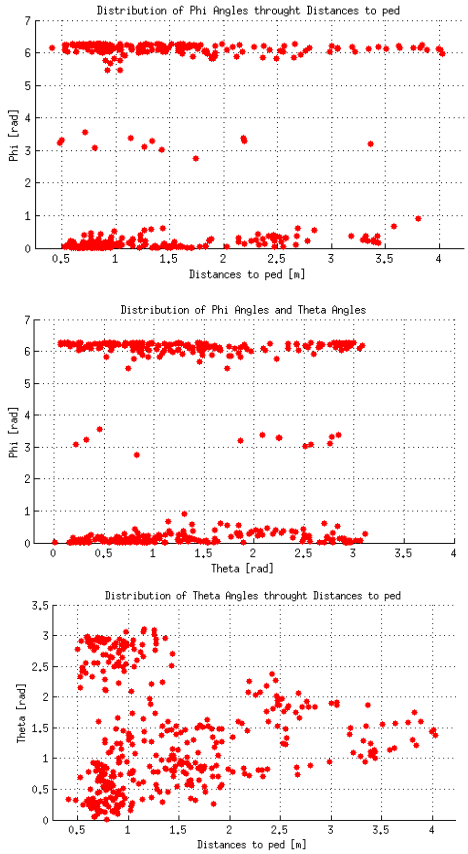


Figura 4: Colección de entrenamientos para todos los episodios seleccionados para DS1. Arriba: Ángulo de aproximación φ vs. distancia d en el marco de referencia local. Medio: Ángulo de aproximación φ vs. θ. Abajo: coordenadas polares (d, θ) de la persona más cercana en el marco de referencia local.

distintas. Estos sets de entrenamientos son usados para aprender la función de recompensa y el resto de personas serán usadas en la evaluación para validar la función estimada.

3.3. Análisis de los datos

Antes de proceder con los detalles finales de los datos de aprendizaje, describimos una evaluación cualitativa de los mismos.

La figura 4 muestra los valores de los indicadores para DS1, la entrada del edificio.

Fig. 4, abajo, muestra las coordenadas polares de la persona más cercana en el marco local. Se pueden resaltar muchos aspectos. El primero de ellos, se observa que la persona más cercana puede situarse tan cerca como 0.5 metros, bien dentro del espacio personal admitido por la teoría de proxémica. También puede verse que si la persona está por debajo de 1 metro de distancia, normal-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

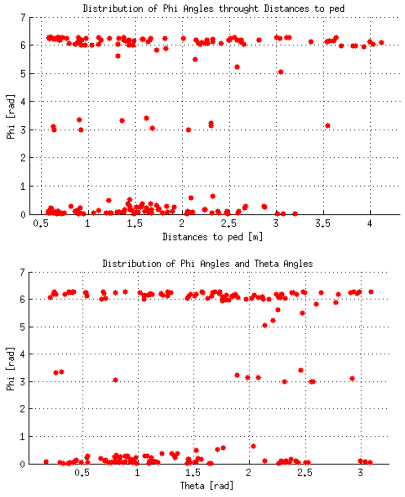


Figura 5: Entrenamientos para DS2. Arriba: Ángulo de aproximación φ vs. distancia d. Abajo: Ángulo de aproximación φ vs. θ.

mente está situada a los lados del robot ($\theta \sim 0$ o $\theta \sim \pi$).

Fig. 4, arriba, muestra la distancia vs. el ángulo de aproximación φ, y θ vs. φ respectivamente. Lo que se puede ver aquí es que típicamente en el escenario, la persona más cercana se mueve en la misma dirección ($\varphi \sim 0$ or $\varphi \sim 2\pi$) mientras que hay menos casos en los que la persona va en dirección contraria ($\varphi \sim \pi$). Apenas encontramos ejemplos en los que las personas se crucen con diferentes ángulos, lo que indica que las personas intentan seguir localmente en términos de dirección el flujo de personas. Además, puede notarse también cómo las personas que se acercan ($\varphi \sim \pi$) están localizadas a los lados del robot.

Estos mismos aspectos se observan para el set de datos DS2, mostrado en la Fig. 5.

3.4. Discretización

El algoritmo GPIRL usa un modelo MDP discreto. Así mismo, los espacios de estado y de acciones están discretizados. Para el espacio de estados usado en el planificador local, la discretización es la siguiente:

- La distancia d está discretizada en 11 intervalos de 0.5 metros.
- El ángulo relativo $theta \in [0\ \pi]$ está discretizado 6 intervalos de 0.62 rads.
- La orientación relativa de la persona $\phi \in [0\ 2\pi)$ está discretizada en 8 intervalos de 0.69 rads.

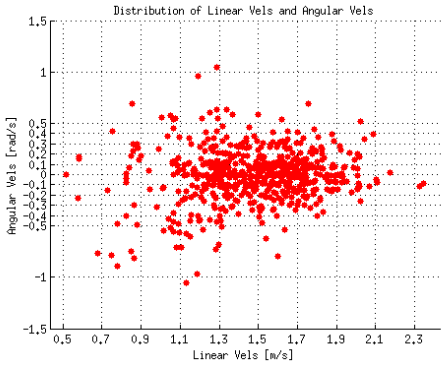


Figura 6: Acciones (velocidades lineal y angular) de las muestras de entrenamiento para ambos escenarios. Se muestra la discretización usada.

La figura 6 muestra para todas las personas consideradas como expertas en ambos sets de datos las velocidades lineales y angulares. La velocidad angular se calcula mediante el cambio de orientación observado en dos instantes consecutivos de la velocidad lineal. El espacio de acciones está discretizado considerando el comportamiento de los expertos en el set de datos (ver Fig. 6). Como estamos aprendiendo cómo moverse entre otras personas presentes, sólo aquellas que se mueven con cierta velocidad son consideradas como expertos; la velocidad lineal se discretiza en 8 intervalos $v \in [0{,}7\ 2{,}1]$ m/s. La velocidad angular se discretiza en otros 11 intervalos comprendidos en $\omega \in [-0{,}5\ 0{,}5]$ rad/s.

4. EVALUACIÓN

Utilizando las muestras de ejemplo obtenidas a partir de los sets de datos y el algoritmo IRL, se obtiene una función de recompensa que asocia un valor escalar para cada estado según sea la acción que se tome. Como primera evaluación de esta función de recompensa, compararemos las acciones elegidas por una persona del set de datos con aquellas que nos arroja la política óptima obtenida tras resolver el modelo MDP descrito anteriormente junto con la función de recompensa extraída.

Esta comparación se lleva a cabo de la siguiente forma: en cada punto de la trayectoria de la persona seleccionada, se obtiene el estado, así como la acción que debería aplicarse de acuerdo a la política y también la acción real llevada a cabo por la persona. Si la política se ajusta perfectamente con el comportamiento de la persona, las acciones del MDP serán muy similares a las reales. En este punto, cabe resaltar que las acciones del MDP no son aplicadas, de modo que en el siguiente punto el estado vuelve a ser el mismo en ambos casos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

De esta forma, calculamos los errores medios en las velocidades lineales y angulares de cada persona del set de datos que no fue usada para los entrenamientos. Para eliminar los efectos de la discretización en las acciones, también se discretizan las acciones llevadas a cabo por las personas consideradas. Además, evaluamos comparativamente 6 casos diferentes basados en el escenario del cual obtenemos la política y el escenario sobre el que aplicamos dicha política. El primer caso (E1) aplica la política obtenida mediante los entrenamientos del DS1 en el propio escenario DS1. La misma evaluación, pero para el caso de DS2, queda recogida en E2. Los dos siguientes experimentos evalúan el comportamiento obtenido en un escenario sobre el escenario contrario (E3 y E4). Los dos últimos experimentos (E5 y E6), tienen en cuenta un entrenamiento conjunto con las episodios de los escenarios DS1 y DS2, y se evalúan los resultados de aplicar la política obtenida en ambos escenario por separado respectivamente.

Cuadro 1: Política basada en IRL vs. Proxémica. Errores medios y desviación estándar.

	Vel Lineal(m/s)		Vel Angular(rad/s)	
	IRL 1	PRX 1	IRL 1	PRX 1
E1	$0{,}267 \pm 0{,}184$	$0{,}363 \pm 0{,}217$	$0{,}078 \pm 0{,}059$	$0{,}094 \pm 0{,}076$
E2	$0{,}329 \pm 0{,}214$	$0{,}371 \pm 0{,}231$	$0{,}100 \pm 0{,}079$	$0{,}102 \pm 0{,}082$
E3	$0{,}300 \pm 0{,}198$	$0{,}367 \pm 0{,}216$	$0{,}086 \pm 0{,}059$	$0{,}094 \pm 0{,}078$
E4	$0{,}255 \pm 0{,}187$	$0{,}279 \pm 0{,}157$	$0{,}074 \pm 0{,}068$	$0{,}111 \pm 0{,}090$
E5	$0{,}280 \pm 0{,}195$	$0{,}361 \pm 0{,}216$	$0{,}074 \pm 0{,}053$	$0{,}095 \pm 0{,}077$
E6	$0{,}258 \pm 0{,}160$	$0{,}269 \pm 0{,}177$	$0{,}069 \pm 0{,}053$	$0{,}089 \pm 0{,}080$

Cuadro 2: Política basada en IRL: (1) vs. (T). Errores medios y desviación estándar.

	Vel Lineal(m/s)		Vel Angular(rad/s)	
	IRL (1)	IRL (T)	IRL (1)	IRL (T)
E1	$0{,}267 \pm 0{,}184$	$0{,}271 \pm 0{,}189$	$0{,}078 \pm 0{,}059$	$0{,}097 \pm 0{,}076$
E2	$0{,}329 \pm 0{,}214$	$0{,}325 \pm 0{,}217$	$0{,}100 \pm 0{,}079$	$0{,}097 \pm 0{,}076$
E3	$0{,}300 \pm 0{,}198$	$0{,}298 \pm 0{,}190$	$0{,}086 \pm 0{,}059$	$0{,}085 \pm 0{,}067$
E4	$0{,}255 \pm 0{,}187$	$0{,}303 \pm 0{,}199$	$0{,}267 \pm 0{,}184$	$0{,}271 \pm 0{,}189$
E5	$0{,}280 \pm 0{,}195$	$0{,}316 \pm 0{,}190$	$0{,}074 \pm 0{,}053$	$0{,}077 \pm 0{,}064$
E6	$0{,}258 \pm 0{,}160$	$0{,}316 \pm 0{,}204$	$0{,}069 \pm 0{,}053$	$0{,}096 \pm 0{,}080$

4.1. Comparativa planificadores locales

Para evaluar los resultados del modelo presentado, empleamos una comparación con un modelo de costes heurístico basado en la teoría de proxémica de Hall, presentada en [7]. En él, una función de costes modela el espacio personal, y es implementada como dos distribuciones Gaussianas [10]. La primera función es asimétrica y se sitúa en frente de la persona con $\sigma_x = 1{,}20m$ y con un espacio más estrecho a los lados $\sigma_y = \sigma_x/1{,}5$. La segunda Gaussiana se sitúa a la espalda de la persona con $\sigma = 0{,}5\sigma_x$.

De este modo se obtiene una función de recompensa que se usa para determinar una política basada en proxémica tras resolver el MDP. Así, podemos comparar ambas políticas del mismo modo.

Los errores obtenidos en todas estas aproximaciones se presentan en la Tabla 1. Puede verse cómo la función de recompensa aprendida (basada en la política IRL) se acerca más en media al comportamiento que la aproximación que utiliza la proxémica. La principal diferencia puede observarse en los comandos de velocidad lineal. Por otro lado, hay una gran variabilidad en los errores, lo que indica que el modelo basado solamente en la persona más cercana parece que adolece de alguna información que las personas utilizan para navegar entre ellas.

4.2. Generalización de un peatón al caso de todos los peatones

En el mundo real, las personas no nos desplazamos por la calle considerando únicamente al peatón más cercano. Normalmente, tomamos en cuenta a varias personas en frente de nosotros situadas a ciertas distancias. Esta es la razón por la cual la función de recompensa presentada debe ser completada con la información correspondiente a los demás peatones que ocupan el área de navegación local. Así pues, el procedimiento anterior se modifica para que en este caso la acción elegida por el robot maximice la suma de recompensas para cada par estado-acción que genera cada peatón considerado dentro del área de planificación local.

En la Tabla 2 puede verse la comparación entre ambos modelos, considerando únicamente al peatón más cercano (1) y la generalización a todos los peatones (T). Puede observarse que no aparecen diferencias significativas con respecto a (1), e incluso en algunos tests empeora el rendimiento. Estos resultados sugieren una revisión de los indicadores tenidos en cuenta a la hora de modelar la función de recompensa, sobre todo para el caso (T).

4.3. Evaluación en diferentes escenarios

Otro aspecto que evaluamos es cómo de transferible resulta la función de recompensa obtenida para diferentes escenarios (DS1 y DS2) donde concurren distintas situaciones como son el espacio, multitud o dirección de los peatones que rodean al robot.

La Tabla 3 muestra los errores cometidos en las acciones de acuerdo al escenario donde aplican y los escenarios de donde se han extraído las políticas. También incluimos una política mixta obtenida de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

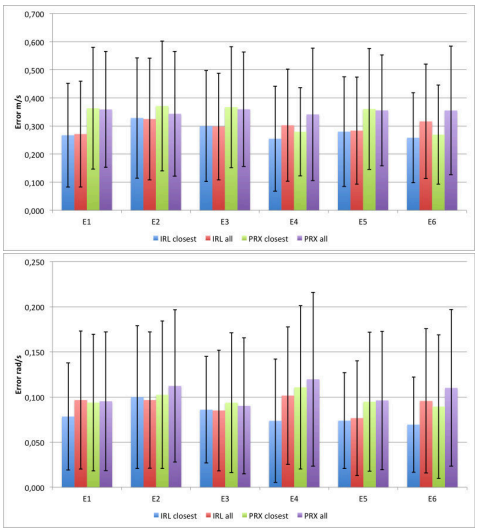


Figura 7: Comparación entre las diferentes políticas y evaluaciones. Arriba: error en las velocidades lineales respecto a las acciones reales. Abajo: error en velocidades angulares. IRL y PRX denotan los resultados basados en IRL y proxémica, respectivamente, cuando son considerados todos los peatones dentro del área de navegación.

Cuadro 3: Comparación entre escenarios. Errores medios y desviación estándar

Escenario DS1

IRL (1)	Política DS1	Política DS2	Política DS1+DS2
Vel Lineal(m/s)	$0{,}235 \pm 0{,}214$	$0{,}242 \pm 0{,}210$	$0{,}242 \pm 0{,}226$
Vel Angular(rad/s)	$0{,}075 \pm 0{,}071$	$0{,}064 \pm 0{,}055$	$0{,}069 \pm 0{,}063$

Escenario DS2

IRL (1)	Política DS1	Política DS2	Política DS1+DS2
Vel Lineal(m/s)	$0{,}254 \pm 0{,}234$	$0{,}297 \pm 0{,}205$	$0{,}250 \pm 0{,}155$
Vel Angular(rad/s)	$0{,}082 \pm 0{,}071$	$0{,}093 \pm 0{,}095$	$0{,}063 \pm 0{,}055$

considerar todos los entrenamientos de ambos escenarios. Puede observarse que no hay diferencias significativas y que además la política mixta tampoco mejora los resultados. En este caso, la política aprendida en un escenario es aplicable en el otro. Si se observan las Figuras 4 y 5, se aprecia que, en este particular, ambos escenarios son muy similares.

En este punto consideramos que para una apropiada evaluación se requerirán unas pruebas más a fondo sobre una mayor variedad de condiciones con los peatones y una reformulación de algunos parámetros del modelo.

Finalmente, en la Fig. 7 se muestra gráficamente la comparación para todas las políticas y experimentos llevados a cabo.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo analiza el uso de la técnica de *inverse reinforcement learning* para aprender funciones de recompensa/costes a partir de ejemplos llevados a cabo por un experto de la tarea de navegación entre personas. Se describen el modelo y la metodología empleados para extraer la función de recompensa a partir de sets de datos accesibles públicamente. Además, la función de recompensa es usada para obtener una política de navegación asociada. Esta política se compara con el comportamiento original de las personas y con otra política derivada de la función de costes que plantea la teoría de la proxémica.

Las comparaciones efectuadas muestran que la política IRL es mejor que la política basada en proxémica en todos los casos. Además, los costes aprendidos pueden usarse en distintas configuraciones. Por otra parte, se empeora el comportamiento si hacemos una extensión lineal del modelo hacia todas las personas que ocupan la región local de planificación. Por lo tanto, podría resultar adecuado tener en cuenta otro tipo de indicadores en situaciones más congestionadas. Además, la variabilidad en los comportamientos obtenidos indican que debería refinarse más a fondo el modelo.

Como trabajo futuro, desarrollaremos modelos que consideren indicadores basados en la densidad y flujo de la multitud para compararlos con estos modelos y analizar sus comportamientos. Además, consideraremos aproximaciones no supervisadas de aprendizaje que nos permitan extraer una posible estructura de los datos disponibles y plantear patrones ejemplo de movimientos para esquivar a otros peatones.

Es más, integraremos este conocimiento en un robot real y llevaremos a cabo experimentos en escenarios con gran multitud de personas, realizando una evaluación cualitativa de la percepción de las personas con respecto al comportamiento que ejecuta el robot.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el VII Programa Marco de la Comisión Europea bajo el acuerdo no. 288235 (FROG) y el proyecto PAIS-MultiRobot financiado por la Junta de Andalucía (TIC-7390).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Pieter Abbeel and Andrew Y. Ng. Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, ICML '04, pages 1–, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[2] S. Alili, M. Warnier, M. Ali, and R. Alami. Planning and plan-execution for human-robot cooperative task achievement. In *19th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 2009.

[3] B.D. Argali, S. Chernova, M. Veloso, and B. Browning. A survey of robot learning from demonstrations. *Robotics and Autonomous Systems*, 57:469–483, 2009.

[4] Aurélie Clodic, Hung Cao, Samir Alili, Vincent Montreuil, Rachid Alami, and Raja Chatila. SHARY: A Supervision System Adapted to Human-Robot Interaction. In Oussama Khatib, Vijay Kumar, and George J. Pappas, editors, *Experimental Robotics, The Eleventh International Symposium, ISER 2008, July 13-16, 2008, Athens, Greece*, volume 54 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 229–238. Springer, 2008.

[5] D. Feil-Seifer and M. Mataric. People-aware navigation for goal-oriented behavior involving a human partner. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)*, 2011.

[6] G. Ferrer, A. Garrell, and A. Sanfeliu. Robot companion: A social-force based approach with human awareness-navigation in crowded environments. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1688–1694, Nov 2013.

[7] Edward T. Hall. *The Hidden Dimension*. Anchor, October 1990.

[8] Peter Henry, Christian Vollmer, Brian Ferris, and Dieter Fox. Learning to navigate through crowded environments. In *ICRA'10*, pages 981–986, 2010.

[9] R. Kirby, J. J. Forlizzi, and R. Simmons. Affective social robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 58:322–332, 2010.

[10] Rachel Kirby, Reid G. Simmons, and Jodi Forlizzi. Companion: A constraint-optimizing method for person-acceptable navigation. In *RO-MAN*, pages 607–612. IEEE, 2009.

[11] Sergey Levine, Zoran Popovic, and Vladlen Koltun. Nonlinear inverse reinforcement learning with gaussian processes. In *Neural Information Processing Systems Conference*, 2011.

[12] M. Luber, L. Spinello, J. Silva, and K.O. Arras. Socially-aware robot navigation: A learning approach. In *IROS*, pages 797–803. IEEE, 2012.

[13] Stefano Pellegrini, Andreas Ess, Konrad Schindler, and Luc van Gool. You'll never walk alone: Modeling social behavior for multi-target tracking. In *International Conference on Computer Vision*, 2009.

[14] R. Ramon-Vigo, N. Perez-Higueras, F. Caballero, and L. Merino. Learning social cost functions for robot local navigation. In *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2014. submitted.

[15] Roland Siegwart, Kai O. Arras, Samir Bouabdallah, Daniel Burnier, Gilles Froidevaux, Xavier Greppin, Björn Jensen, Antoine Lorotte, Laetitia Mayor, Mathieu Meisser, Roland Philippsen, Ralph Piguet, Guy Ramel, Gregoire Terrien, and Nicola Tomatis. Robox at Expo.02: A large-scale installation of personal robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(3-4):203–222, March 2003.

[16] Emrah Akin Sisbot, Luis Felipe Marin-Urias, Rachid Alami, and Thierry Siméon. A Human Aware Mobile Robot Motion Planner. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):874–883, 2007.

[17] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, and C. Hahnel. Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva. *The International Journal of Robotics Research*, 19:972–999, October 2000.

[18] Gian Diego Tipaldi and Kai O. Arras. Planning Problems for Social Robots. In *Proceedings fo the Twenty-First Internacional Conference on Automated Planning and Scheduling*, pages 339–342, 2011.

[19] Peter Trautman and Andreas Krause. Unfreezing the robot: Navigation in dense, interacting crowds. In *IROS*, pages 797–803. IEEE, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DESARROLLO METODOLÓGICO DE SISTEMAS DE CONTROL APLICANDO INGENIERÍA CONDUCIDA POR MODELOS

M.L. Alvarez[1]
[(1)]*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, EUITI de Bilbao, UPV/EHU*
marialuz.alvarez@ehu.es

A. Burgos[1], I. Sarachaga[2], E. Estévez[3], M. Marcos[2]
[(2)]*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, ETSI de Bilbao, UPV/EHU*,
[(3)]*Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, EPS de Jaén, Jaén*

Resumen

La complejidad creciente de los sistemas automatizados demanda metodologías y herramientas que integren las disciplinas de la ingeniería del software con los métodos y estándares del campo de la automatización para acometer el desarrollo del software de control de dichos sistemas. Conforme a estas expectativas, este trabajo presenta un nuevo enfoque que utiliza los principios de la ingeniería conducida por modelos para desarrollar sistemas de control metodológicamente, siguiendo las directrices de **MeiA** *(Methodology for industrial Automation systems)***.** *Una interfaz gráfica amigable dirige el análisis del sistema, mientras que las transformaciones garantizan desarrollos estructurados y bien documentados de calidad con menores tiempos de implementación. La aplicabilidad de este nuevo enfoque se ilustra mediante un caso de estudio.*

Palabras Clave: Automatización, metodología de desarrollo, herramientas de ingeniería, PLCopen XML, IEC 61131-3.

1 INTRODUCCIÓN

La industria actual debe abordar un cambio tecnológico en los procesos de producción para mantener el liderazgo en el entorno económico del tercer milenio. De acuerdo con el Grupo Asesor Industrial de la Comisión Europea [11], las "fábricas del futuro" requieren sistemas automatizados más complejos, seguros y fiables. Para acometerlos, las claves de las tecnologías avanzadas de fabricación residen en la robótica, la automatización y la fabricación integrada por ordenador [6], [31].

En este contexto, el desarrollo de software de control constituye uno de los retos en el campo de la automatización para garantizar la disponibilidad de una planta que proporcione una producción de alta calidad con cero defectos. El desarrollo de este tipo de software se enfrenta a la complejidad de integrar las tecnologías de la información en el entorno industrial a la hora de transformar información en acciones de dispositivos de un modo totalmente controlado. Para ello, es preciso generar, transmitir y procesar la información de modo rápido, exacto y fiable, en cantidad y calidad adecuadas a las necesidades específicas, en el momento preciso y en el lugar idóneo. Este flujo distribuido de datos debe garantizar el correcto flujo de materiales de un modo automático.

Para satisfacer estos requisitos es preciso que los últimos avances en hardware, software y tecnologías de la información y las comunicaciones soporten el ciclo de vida de las aplicaciones. En este sentido, trabajos recientes realizan una inspección crítica sobre el estado del arte en relación con las prácticas de ingeniería de software, métodos y herramientas que se utilizan en el ciclo de desarrollo de aplicaciones de automatización [10], [16], [19], [23], [29], [36]. Los autores coinciden en la necesidad de nuevas metodologías y herramientas debido al gran esfuerzo que requiere la adaptación de las existentes para incorporarlas en el dominio de la automatización. Entre los temas pendientes para futuras investigaciones apuntan una nueva generación de herramientas de ingeniería que abarquen más de una fase de desarrollo; en particular, el análisis con el fin de evitar malos entendidos en el proceso de especificación de los requisitos. Por lo tanto, la adopción de los principios de ingeniería de software en la automatización industrial requiere la integración de métodos y herramientas o, al menos, que estas últimas proporcionen interfaces con otras herramientas de ingeniería.

Además, con el fin de hacer frente a la creciente complejidad del software, se deben introducir mayores niveles de abstracción durante el proceso de desarrollo, tal y como propugna MDE (Model Driven Engineering) [30]. Las tecnologías MDE combinan

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

abstracciones específicas de dominio (descritas mediante meta-modelos que expresan la ontología del dominio) que permiten definir la estructura de la aplicación, su comportamiento y los requisitos para dominios particulares, y los motores de transformación y generadores que procesan determinados aspectos de los modelos para sintetizar varios tipos de artefactos.

Dado que en la bibliografía reciente existen numerosas propuestas de entornos de desarrollo integrados que adoptan los principios de la ingeniería del software conducida por modelos, MDE puede considerarse una tendencia en el área de la automatización industrial. La mayoría de los trabajos utilizan UML (Unified Modeling Language) o SysML para describir los modelos de dominio y los estándares IEC 61131 [7], [9], [12], [14], [33] o IEC 61499 [32], [34], [35] para realizar la implementación. Casi todos ellos soportan el desarrollo de aplicaciones de automatización, pero apenas cubren la fase inicial de análisis de requisitos, aunque existe un claro desafío en este ámbito [8], [14], [27].

Sin embargo, estos trabajos están lejos del dominio del problema, lo que conlleva una baja aceptación por parte de la industria [24]. La alternativa reside en lenguajes de modelado específicos de dominio y herramientas [20] basadas en métodos y estándares ampliamente utilizados en el campo de la automatización. En este contexto, GRAFCET (GRAphe Fonctionnel de Commande, Etapes, Transitions) [2] está muy extendido como lenguaje de modelado, y GEMMA (Guide d'Étude des Modes de Marches et d'Arrêts) [1] constituye su extensión natural para definir los modos de operación.

Varios autores han desarrollado diferentes metodologías que combinan GEMMA y GRAFCET. Por ejemplo, [26] propone la implementación del ciclo de producción con GRAFCET como punto de partida para aplicar GEMMA con el fin de desarrollar sistemas de automatización. [13] combina el diagrama de casos de uso de UML [18], GEMMA y GRAFCET en una metodología orientada a objetos para sistematizar el modelado de sistemas secuenciales de eventos discretos. [22] traduce el GEMMA asociado al comportamiento del sistema a un SFC (Sequential Function Chart) [15] de alto nivel y cada estado GEMMA se traduce a SFCs de bajo nivel, logrando la sincronización a través de la coordinación vertical. Sin embargo, ninguna de estas metodologías se beneficia de las ventajas de MDE.

Con objeto de paliar esta problemática, este trabajo presenta un herramienta [3] desarrollada bajo el enfoque MDE que implementa **MeiA**$_{\bullet}$ (Methodology for industrial Automation systems) [4][5]. Concebida para desarrollar software de control en el ámbito de la ingeniería de automatización de procesos, **MeiA**$_{\bullet}$ proporciona directrices de diseño con el fin de guiar metodológicamente a los desarrolladores a través del proceso de desarrollo, desde el análisis y el diseño, hasta la implementación y operación.

Como capa de abstracción para el usuario final, la herramienta proporciona una interfaz fácil de usar que permite un desarrollo sencillo y gráfico de las aplicaciones. Además, genera la documentación de análisis y diseño utilizando la terminología del dominio, y las unidades mínimas de diseño (denominadas DOUs - Design Organization Units) necesarias para generar los POUs (Program Organization Units). Estos últimos se generan en formato XML PLCopen [25] utilizando un generador de código para el SFC de IEC 61131-3 [21].

La estructura del artículo es la siguiente: en el apartado 2 se describe **MeiA**$_{\bullet}$ destacando los aspectos relacionados con la integración de los métodos y estándares del campo de la automatización industrial y la ingeniería del software. El apartado 3 presenta la herramienta que implementa dicha metodología, mientras el desarrollo de un caso de estudio se presenta en el apartado 4. Finalmente, las conclusiones y perspectivas futuras se exponen en el apartado 5.

2 MeiA$_{\bullet}$ (Methodology for industrial Automation systems)

Concebida para desarrollar software de control en el ámbito de la ingeniería de automatización de procesos, **MeiA**$_{\bullet}$ combina la madurez de las disciplinas de la ingeniería de software con los métodos y estándares del campo de la automatización industrial.

En lo referente a la ingeniería del software, **MeiA**$_{\bullet}$ adopta el estándar internacional ISO/IEC 12207 Ingeniería de software y sistemas - Procesos del ciclo de vida del software [17], que establece el marco de referencia de los procesos, las actividades y las tareas involucradas en el desarrollo, la explotación y el mantenimiento de un producto software, abarcando la vida del sistema desde la definición de los requisitos hasta la finalización de su uso.

No obstante, el estándar no detalla los procesos en términos de métodos o procedimientos necesarios para cumplir con los requisitos y los resultados del proceso. En este sentido, **MeiA**$_{\bullet}$ adopta los métodos y estándares del campo de la automatización industrial proporcionando directrices y plantillas para definir los sistemas de control industrial

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

metodológicamente con la sintaxis y el léxico que los desarrolladores emplean habitualmente. Partiendo de los requisitos de usuario, MeiA guía a los desarrolladores en *los procesos de Implementación (Análisis de requisitos, Diseño de Arquitectura, Diseño Detallado, Construcción, Integración* y *Pruebas del software) y Gestión de la Documentación del Software*:

- En el proceso de *Análisis de Requisitos,* MeiA integra GEMMA y el diagrama de casos de uso para identificar los requisitos de control y supervisión, así como la configuración del panel de operador y demás paneles auxiliares necesarios.
- En los procesos de *Diseño,* MeiA incorpora el lenguaje de modelado GRAFCET para generar los DOUs. Se distinguen tres tipos de DOUs:
  - *DOUs de decisión* que organizan el arranque y la parada de los distintos modos de funcionamiento, y coordinan todos los posibles estados del sistema.
  - *DOUs de producción* que realizan las operaciones de producción, coordinación de operaciones, selección de parámetros de producción, etc.
  - *DOUs auxiliares* que realizan procedimientos de inicialización, preparación, paros, avisos, etc.
- En el proceso de *Construcción,* MeiA facilita la definición de las unidades de código necesarias (POUs) para generar el proyecto de automatización conforme al estándar IEC 61131-3. Por cada DOU se genera un POU de tipo bloque funcional.
- Para el proceso de *Gestión de la Documentación,* MeiA plantea la generación de la documentación asociada a los distintos procesos usando la terminología del dominio en formato textual y gráfico.

MeiA proporciona un conjunto de directrices y plantillas que guían al desarrollador en todos estos procesos para incorporar la reutilización de software desde etapas tempranas. Dichas plantillas son los activos reutilizables que requieren una gestión efectiva para soportar un proceso dinámico de construcción y adaptación que permita explotar sistemáticamente nuevas oportunidades de reutilización.

Por último, MeiA establece un proceso de *Planificación del Proyecto* evolutivo inherente al carácter incremental de su ciclo de vida. La metodología consta de fases que permiten abordar el sistema de control desde diferentes perspectivas (Figura 1). Cada fase engloba un conjunto de pasos que permiten realizar la definición de la funcionalidad con distintos niveles de detalle y, por ende, los DOUs.

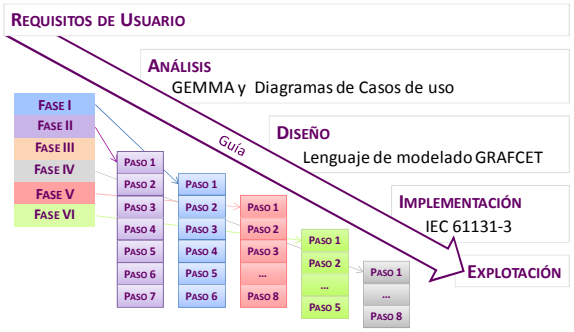


Figura 1: Modelo de ciclo de vida de un proyecto

La Fase I -Secuencia Principal/Modo Automático- establece la secuencia principal del sistema, que organiza tanto el arranque del sistema en modo automático como la parada programada del mismo.

La Fase II -Modo Manual- organiza tanto el arranque como la parada del sistema para funcionar manualmente cuando existe la necesidad de verificar individualmente ciertos movimientos o partes del proceso sin respetar el orden habitual del ciclo, normalmente bajo el control del personal de mantenimiento.

Fase III -Modo de Pruebas- analiza la necesidad de verificar paso a paso o de forma continua ciertos movimientos o partes del proceso, respetando el orden habitual del ciclo según el ritmo que marque el personal a cargo de dicha tarea.

Fase IV –Fallos- se identifican, analizan y evalúan los fallos que pueden producirse en el proceso, identificando dos tipos: aquéllos que permiten que el sistema siga en producción y aquéllos que forzosamente harán evolucionar el sistema hacia una parada controlada.

Fase V -Paro de emergencia- organiza tanto el arranque como la parada del sistema para el tratamiento de emergencias.

Fase VI -Producción Normal- se analizan las operaciones del proceso, se establece el orden de realización definiendo el ciclo normal de producción, y se identifican, analizan y diseñan los procedimientos que realizarán dichas operaciones.

Un proyecto de automatización mínimo precisa abordar la fase Secuencia Principal – Modo Automático y la fase Producción Normal, aunque se considera incompleto si no contempla un Paro de Emergencia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3 HERRAMIENTA MeiA

Desarrollada bajo el enfoque MDE, la herramienta MeiA satisface los siguientes requisitos:

- Una interfaz gráfica amigable que permita un proceder sencillo, intuitivo y gráfico, siguiendo la metodología MeiA.
- Un proceso de desarrollo incremental que permita trabajar a diferentes perfiles a través del análisis, el diseño y la implementación.
- La generación de documentación de análisis y diseño utilizando la terminología del dominio, es decir, la guía GEMMA, el diagrama de casos de uso con las descripciones de los casos de uso y los DOUs.
- La generación de los POUs en formato XML PLCopen a partir de los DOUs.
- El almacenamiento de los activos generados en repositorios distribuidos para su gestión.

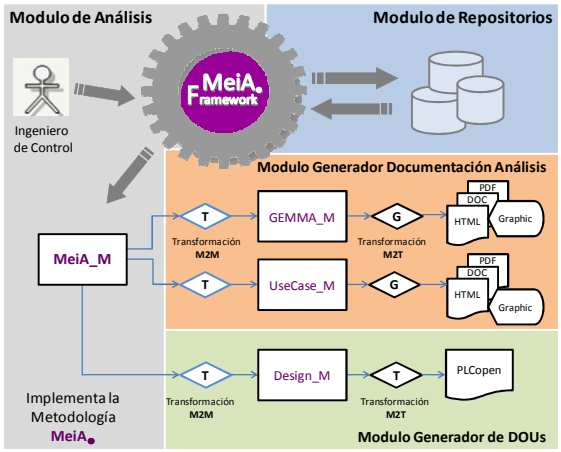


Figura 2: Arquitectura de la herramienta MeiA

La arquitectura de esta herramienta consta de 4 módulos (Figura 2):

- El *Módulo de Análisis* guía al usuario a través de las fases y pasos de MeiA por medio de menús y perspectivas. Como salida se obtiene el modelo MeiA_M que contiene toda la información de análisis y diseño del sistema de control a implementar.
- El *Módulo Generador de Documentación de Análisis* genera el modelo GEMMA_M y el modelo del diagrama de casos de uso (UseCase_M). A partir de estos modelos se genera la documentación de análisis.
- El *Módulo Generador de DOUs* genera el modelo de diseño Design_M compuesto por los DOUs, a partir de los cuales se generan los POUs automáticamente en el formato XML de PLCopen.
- El *Módulo de Repositorios* consta de repositorios distribuidos que almacenan los modelos y los POUs [28] generados para el sistema de control, de forma que se pueda realizar una gestión efectiva de los mismos.

Los modelos citados son conformes a sus respectivos metamodelos. Cada metamodelo describe los conceptos del dominio, las relaciones entre ellos y las reglas de composición que definen las limitaciones del dominio semántico.

La generación de los modelos de análisis (GEMMA_M, UseCase_M) y el modelo de diseño (Design_M) se realiza mediante transformaciones modelo a modelo (M2M - Model To Model) a partir del modelo MeiA_M. Para la definición de las transformaciones se han establecido un conjunto de reglas que describen cómo elementos de un metamodelo son transformados en uno o más elementos del metamodelo destino.

Por otra parte se utilizan generadores que implementan transformaciones M2T (M2T - Model To Text) para generar la documentación de análisis y diseño (tanto en representación gráfica coma textual) y la generación de los POUs en formato PLCopen.

4 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio aborda el desarrollo del software de control de la célula de ensamblado FMS-200, que consta de 5 estaciones independientes y un sistema de transporte encargado de gestionar el movimiento de los palets entre las distintas estaciones. El sistema se ha desarrollado de tal forma que cada estación puede funcionar independientemente o de forma conjunta con el resto de estaciones. Esto ha permitido validar cada estación de forma individual, antes de integrar todo el sistema.

En la célula se ensambla un conjunto formados por 4 piezas (base, rodamiento, eje y tapa), pudiéndose montar diferentes combinaciones de estas cuatro piezas.

La estación 1 (Ubicación Base – S1) realiza el proceso de alimentación de la base (soporte del producto ensamblado) sobre el palet situado en la posición de carga de la estación. Las bases se alimentan de un almacén vertical. La manipulación que se realiza en esta estación debe garantizar la correcta ubicación de la base en el palet.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

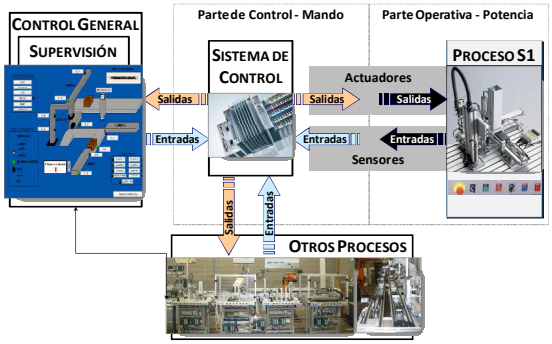


Figura 3: Sistema de control de la Estación 1

El sistema de control de la estación (Figura 3) se ha desarrollado utilizando la herramienta MeiA, la cual proporciona una interfaz gráfica que guía a los desarrolladores a través de las fases de la metodología. Como paso previo, por medio del menú "Proyecto", el analista introduce los requisitos de usuario y selecciona las fases de análisis para el sistema de control particular.

En el caso de la estación 1 se han analizado las siguientes fases: Modo Automático, Modo Manual, Pruebas, Fallos, Paro de Emergencia y Producción Normal. En cada fase se realiza el análisis a través de un conjunto de pasos. Debido a que ciertos pasos pueden requerir la modificación o ampliación de los resultados del análisis en otra fase, la herramienta permite trabajar cada fase de forma independiente pero facilitando el movimiento entre ellas.

El resultado es el modelo MeiA_M (Figura 4) que contiene toda la información requerida para el diseño del sistema de control. Partiendo de este modelo y mediante las distintas transformaciones, la herramienta proporciona la guía GEMMA, los Casos de Uso y los DOUs.

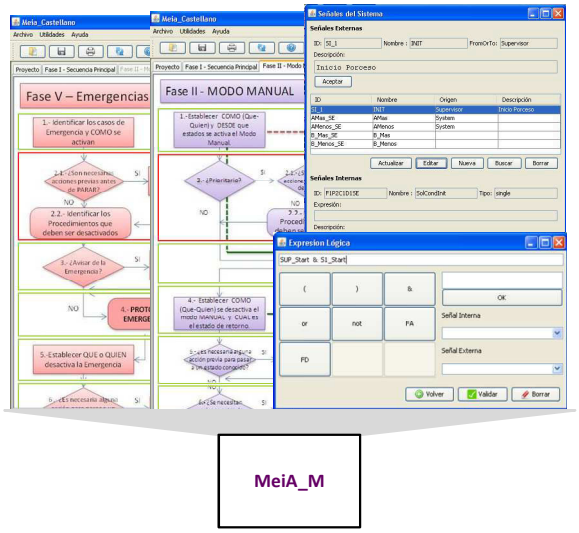


Figura 4: Modelo MeiA_M obtenido tras la realización del análisis

La Figura 5 ilustra la introducción de datos de los dos primeros pasos de la Fase I a través de su interfaz. En el *Paso 1- Funcionamiento Automático*, se analiza la forma de activar o poner en marcha el sistema en modo automático. En el *Paso2 – Inicialización de la Parte Operativa – Condiciones Iniciales y de Seguridad*, se analiza si es necesario realizar algún procedimiento para que se cumplan las condiciones

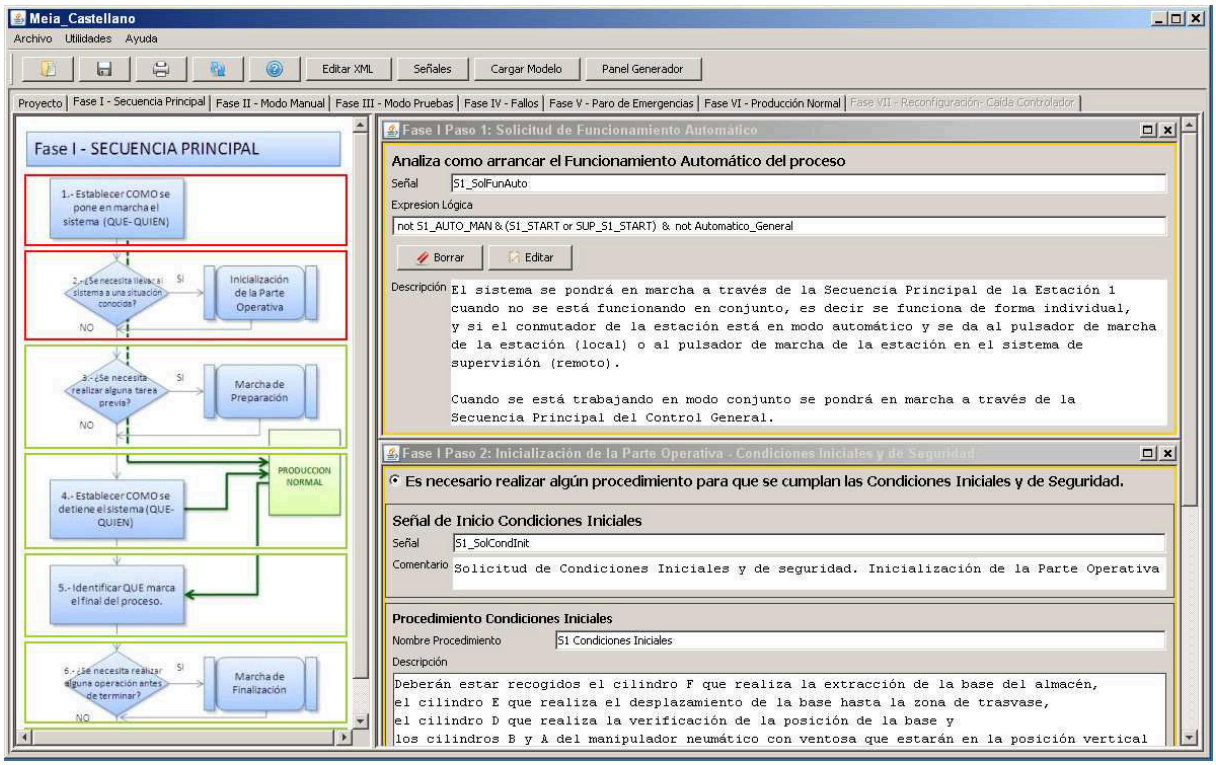


Figura 5: Interface de la Fase I

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

iniciales y de seguridad. En tal caso, se establecen las señales para la activación e indicación de finalización del procedimiento y la descripción del mismo. Dicha descripción se puede realizar con distinto nivel de detalle: un texto descriptivo y/o una secuencia de pasos y/o la URI del procedimiento.

Tras completar la Fase I, estos pasos iniciales permiten identificar en **GEMMA** los primeros estados en los que se puede llegar a encontrar el proceso y las causas que provocan la evolución de un estado a otro (Figura 6).

Partiendo del sistema en el estado ***Paro en estado inicial***, al solicitar su funcionamiento automático, se pasará al estado ***Inicialización de la Parte Operativa*** donde se verificarán las condiciones iniciales y de seguridad de la estación. De este estado se pasará al estado de ***Marcha Preparación***, donde se comprobará la carga del almacén, como paso previo al estado ***Producción Normal***. Cuando el sistema se encuentra en producción y se solicita la parada a fin de ciclo, el sistema pasará al estado ***Demanda de Paro a Fin de Ciclo*** hasta que se finalice éste.

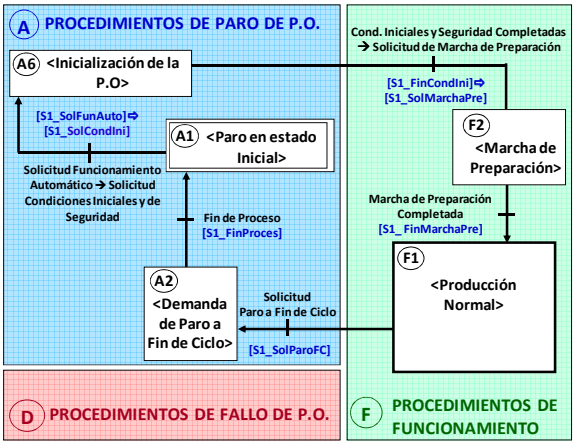


Figura 6: GEMMA Fase I

Los **casos de uso** identificados y analizados en la fase son "Solicitar funcionamiento automático" que incluye los casos de uso "Inicializar la parte operativa" y "Solicitar marcha de preparación", "Solicitar parada a fin de ciclo" y "Atender falta de palets". En este caso, el personal de planta será quien solicite el funcionamiento y la parada a fin de ciclo.

En esta fase se desarrollan 4 **DOUs**:

- Secuencia Principal: DOU de decisión que organiza el arranque y la parada de la estación 1 cuando trabaja en modo individual (Figura 7). Este DOU dará paso a otros tres DOUs auxiliares: Condiciones Iniciales y de seguridad, Marcha de preparación y carga de bases en el almacén.
- Inicialización Parte Operativa – Condiciones Iniciales y de Seguridad: lleva la estación a una situación de partida conocida y segura en la que todos los elementos se encuentran en sus posiciones iniciales y no hay bases fuera del almacén.
- Marcha de Preparación: asegura que el almacén esté cargado antes de comenzar la producción.
- Carga de bases en el almacén: se encarga de gestionar la carga del almacén.

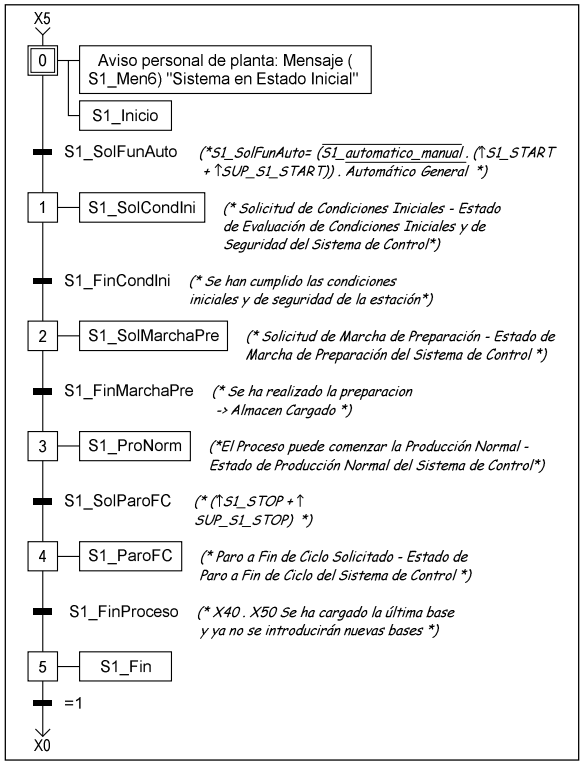


Figura 4: Secuencia Principal

Trabajando el resto de fases de la misma forma y concluido el análisis, la herramienta proporciona los resultados finales del sistema de control: GEMMA, casos de uso (Tabla 1) y DOUs (Tabla 2).

Tabla 1. Casos de Uso Sistema de Control Estación 1

Fase	Actores	Casos de uso
I	Control General Personal Planta	Solicitar funcionamiento automático <<include>> Inicializar parte operativa Solicitar marcha de preparación
		Solicitar parada a fin de ciclo
I - VI	P. Planta	Atender falta de bases
II	P. Mantenimiento	Solicitar funcionamiento manual
		Solicitar parada funcionamiento manual
IV	Sist. de Transporte P. Planta	Atender falta de palet
V	Control General P. Planta P. Mantenimiento	Solicitar emergencia
		Solicitar parada de emergencia

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 2. DOUs Sistema de Control Estación 1

Fase	DOUs
I	Secuencia principal Condiciones Iniciales Marcha de Preparación Carga de Bases en el almacén
II	Manual
IV	Fallos
V	Emergencia
VI	Extraer y Verificar Base Base sobre Pales Almacén de Bases

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un nuevo enfoque que utiliza los principios de MDE para desarrollar sistemas de control metodológicamente, siguiendo las directrices de MeiA, que integra la madurez de las disciplinas de la ingeniería del software con los métodos y estándares extendidos en el ámbito de la automatización.

Una interfaz gráfica amigable dirige el análisis del sistema, mientras que las transformaciones garantizan desarrollos estructurados y bien documentados de calidad con menores tiempos de implementación. El almacenamiento de los modelos y POUs en repositorios distribuidos permite la reutilización de software en diferentes niveles: desde la unidad mínima de reutilización (POU) hasta todo el proyecto de automatización.

El trabajo actual se centra en la inclusión de una nueva etapa que analice la información necesaria para lograr la reconfiguración del sistema de control.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto DPI2012-37806-C02-01 del Gobierno Español, el proyecto IT719-13 del Gobierno Vasco y el proyecto UFI11/28 de la UPV/EHU.

Referencias

[1] ADEPA - Agence nationale pour le DEveloppment de la Production Automatisée (1981), *GEMMA (Guide d'Étude des Modes de Marches et d'Arrêts).* Available: http://ebookbrowse.com/livre-gemma-adepa-pdf-d94951437

[2] AFCET (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique) Commission, (1977) "Normalisation de la Représentation du Cahier des Charges d'un Automatisme Logique", Technical report.

[3] Alvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., Estévez, E., Marcos, M., (2012) "A methodological support for designing industrial control systems", *17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation,* Poland.

[4] Alvarez, M.L., Burgos, A., Sarachaga, I., Estévez, E., Marcos, M., (2012) "GEMMA based approach for generating PLCopen automation projects", *1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control,* Wurzburg (Germany).

[5] Alvarez, M. L., Estévez, E., Sarachaga, I., Burgos, A., Marcos, M., (2013) "A novel approach for supporting the development cycle of automation systems", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 68.

[6] Aschhoff, B., Crass, D., Cremers, K., Grimpe, C., Rammer, C., Brandes, F., Diaz-Lopez, F., Klein Woolthuis, R., Mayer, M., Montalvo, C., (2010) *European Competitiveness in Key Enabling Technologies,* ZEW & TNO.

[7] Beremiz (2007). Available: http://www.beremiz.org/index.html.en

[8] Böttcher, B., Badinger, J., Moriz, N., Niggemann, O., (2013) "Design of Industrial Automation Systems - Formal Requirements in the Engineering Process", *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA),* Cagliari (Italy).

[9] Chiron, F., Kouiss, K., (2007) "Design of IEC 61131-3 Function Blocks Using SysML", *15th Mediterranean Conference on Control & Automation,* Athens, pp. 915-919.

[10] Dubey, A., (2011) "Evaluating software engineering methods in the context of automation Applications". *Proc. 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics,* Caparica and Lisbon (Portugal).

[11] EFFRA & MANUFUTURE – EU, (2010) *"Factories of the Future PPP. Strategic Multi-Annual Roadmap",* Ad-hoc Industrial Advisory Group of the "Factories of the Future" Public-Private Partnership (AIAG FoF PPP).

[12] Estévez, E., Marcos, M., Gangoiti, U., (2005) "A Tool Integration Framework for Industrial Distributed Control Systems", *44th IEEE Conference on Decision and Control,* Seville (Spain), pp. 8373-8378.

[13] González, V.M., Mateos F., Ng A., (2004) "MLAV: the Object-oriented Methodology of the Virtual Automation Lab", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* New Orleans (USA).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[14] Hästbacka, D., Vepsäläinena, T., Kuikka, S., (2011) "Model-driven development of industrial process control applications", *Journal of Systems and Software,* vol. 84, no. 7.

[15] IEC 60848, (2002) "GRAFCET specification language for sequential function charts", International Electrotechnical Commission.

[16] Insaurralde, C.C., Zoitl, A., (2013) "System Requirements in Industrial Automation - A Review of Modeling Methodologies for Control Software Architectures", *Proc. 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN),* Bochum (Germany).

[17] ISO/IEC 12207, (2008) *"Systems and software engineering — Software life cycle processes"*.

[18] Jacobson, I., (1992) *Object Oriented Software Engineering. A Use Case Driven Approach,* Addison Wesley.

[19] Jetley, R., Nair, A., Chandrasekaran, P., Dubey, A., (2013) "Applying Software Engineering Practices for Development of Industrial Automation Applications", *11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN),* Bochum (Germany).

[20] Kandare, G., Strmcnik, S., Godena, G., (2010) "Domain specific model-based development of software for programmable logic controllers", *Computers in Industry,* vol. 61, no. 5.

[21] Lüder, A., Estévez, E., Hundt, L., Marcos, M., (2010) "Automatic transformation of logic models within engineering of embedded mechatronical units", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 54, no. 9-12, pp. 1077-1089.

[22] Machado, J. and Seabra, E., (2010) "A systematized approach to obtain dependable controllers specifications", *ABCM Symposium Series in Mechatronics,* vol. 4, pp. 408-417.

[23] Magar, C.R., Jazdi, N., Göhner, P., (2011) "Requirements on Engineering Tools for Increasing Reuse in Industrial Automation", *IEEE 16th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA),* Toulouse (France).

[24] Papakonstantinou, N., Sierla, S., Koskinen, K., (2011) "Object oriented extensions of IEC 61131-3 as an enabling technology of software product lines", *IEEE 16th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA),* Toulouse (France).

[25] PLCopen, (2008) "XML Schemes and documentation". Available: http://www.plcopen.org/pages/tc6_xml/

[26] Ponsa, P., Vilanova, R., Díaz, M., (2006) "Introduction of the human operator into the automation cycle with the GEMMA guide", *International Control Conference,* Glasgow (Scotland), pp. 1-6.

[27] Runde, S., Fay, A., (2011) "Software Support for Building Automation Requirements Engineering - An Application of Semantic Web Technologies in Automation", *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 7, no. 4, pp. 723-730.

[28] Sarachaga, I., Estévez, E., Armentia, A., Burgos, A., Marcos, M., Orive, D., (2009) "Using web services to support the design phase of manufacturing applications", *42nd CIRP Conference on Manufacturin Systems,* Grenoble (Germany).

[29] Sauter, T., Soucek, S., Kastner, W., Dietrich, D., (2011) "The evolution of factory and building automation. Past, present and future", *IEEE Industrial Electronics Magazine*.

[30] Schmidt, D.C., (2006) "Model Driven Engineering," *IEEE Computer Society,* vol. 39, no. 2, pp. 25-31

[31] Secundo, G., Passiante, G., Romano, A. Moliterni, P., (2013) "Developing the Next Generation of Engineers for Intelligent and Sustainable Manufacturing: A Case Study", *International Journal of Engineering Education,* 29 (1), pp. 248-262.

[32] Thramboulidis, K., Perdikis, D., Kantas, S., (2007) "Model driven development of distributed control applications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 33, no. 3-4, pp. 233-242.

[33] Thramboulidis, K., Frey, G., (2011) "Towards a Model-Driven IEC 61131-Based Development Process in Industrial Automation", *Journal of Software Engineering and Applications,* vol. 4 no. 4, pp. 217-226.

[34] Tranoris, C., Thramboulidis, K., (2006) "A tool supported engineering process for developing control applications", *Computers in Industry,* vol. 57, no. 5, pp. 462-472.

[35] Vyatkin, V., Hanisch, H.M., Pang, C., Yang, C.H., (2009) "Closed-loop modeling in future automation system engineering and validation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews,* vol. 39, no. 1, pp. 17-28.

[36] Vyatkin, V., (2013) "Software Engineering in Industrial Automation: State-of-the-Art Review", *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 9, no. 3, pp. 1234-1249.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Plataforma para la implementación y validación de algoritmos de control de tiempo real en mini-helicópteros de varios rotores

Luis Ródenas luirdelo@aii.upv.es
Ricardo Sanz rsanz@aii.upv.es
Pablo Albiol pabalgr@etsii.upv.es
Alberto Castillo alcasfra@etsii.upv.es
Daniel Verdú davertor@etsii.upv.es
Pedro García pggil@isa.upv.es

Instituto de Automática e Informática Industrial. Universidad Politécnica de Valencia

Resumen

En este trabajo se presenta una plataforma para la implementación y validación de algoritmos de control en mini-helicópteros de varios rotores. La plataforma, se compone de una unidad de control terrestre (UCT) y un quadrotor con un sistema empotrado de control. La configuración del sistema empotrado, permite la ejecución de las tareas de control más críticas sobre un Sistema Operativo de Tiempo Real (SOTR). Para validar la plataforma, se han implementado varios algoritmos de control. Los resultados experimentales muestran el buen desempeño del sistema propuesto así como una fácil implementación y ajuste de los algoritmos de control considerados.

Palabras clave: Plataforma de desarrollo para quadrotors, Sistemas de tiempo real, PIDs y control no lineal por saturaciones.

1. Introducción

Un vehículo aéreo remotamente pilotado, "Remotely Piloted Aircraft Systems" (RPAS) es un vehículo aéreo capaz de realizar misiones en modo (semi) autónomo. Los mini-helicópteros con varios motores, son una clase de *RPAS* que han ocupando la atención de los investigadores durante los últimos años [4, 7].

Recientemente ha empezando a plantearse su uso en múltiples aplicaciones civiles de todo tipo. Cabe destacar que, en todo el mundo, se esta empezando a regular de manera más estricta el vuelo de UAVs; en España, concretamente, su uso con fines comerciales y civiles acaba de ser regulado en el BOE del 5 de julio de 2014 (página 59 de [29]).

En cualquier caso, la proyección que se prevé para este sector, y la necesidad de desarrollar nuevas estrategias de control que puedan adaptarse fácil y rápidamente a la futura normativa, justifica el desarrollo de nuevas plataformas para la implementación y validación de nuevos algoritmos de control. La Unión Europea también considera, en su programa HORIZONTE 2020, los RPAS, y en particular los helicópteros de varios rotores, un sector estratégico de cara a su uso en aplicaciones civiles.

El desarrollo de un sistema de control para un RPAS no es trivial, debido principalmente a la compleja dinámica inherente a los sistemas aéreos, los cuales son multivariables, normalmente subactuados y no lineales [20, 21]. Equipado, normalmente, con un sistema empotrado de control, este vehículo puede emplear diferentes sensores, como cámaras de video, GPS, láser, detectores infra-rojos, detectores ultra-sonidos, etc., para poder navegar en un ambiente desconocido (ver por ejemplo, [6] [24]). El desarrollo del sistema de control para este tipo de vehículos no sólo implica un adecuado ajuste de las leyes de control, sino, la ejecución de las mismas de forma segura, y en el menor tiempo de muestreo posible [19]. Igual de importante es que la tarea de control que implemente el algoritmo de control presente el menor retardo (jitter) posible [3]. Como es sabido, este objetivo se puede cumplir fácilmente realizando la implementación sobre un micro-controlador y/o en un mini-PC con un Sistema Operativo de Tiempo Real (SOTR).

Un problema crucial, cuando se trabaja con este tipo de sistemas, es la necesidad de disponer de una herramienta que nos permita interactuar con el sistema empotrado en la fase de ajuste on-line de los parámetros de control [1, 21, 5].

El trabajo presentado, consiste en el desarrollo de una plataforma genérica para la implementación y validación de un sistema empotrado de control en un quadrotor. La plataforma esta concebida para permitir una fácil implementación y comparación entre diferentes algoritmos de control.

El resto del artículo está estructurado en las siguientes secciones: en la sección 2 se describe la herramienta desarrollada para la solución adopta-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

da, mientras que en la sección 3 se plantea tanto el modelado matemático como las leyes de control básicas del quadrotor. En la sección 4 se presentan los resultados experimentales, y en la sección 5 las conclusiones y futuros trabajos.

2. Descripción de la plataforma

En esta sección se realiza una descripción de la plataforma desarrollada. Ésta consta de una Unidad de Control Terrestre (UCT) que se utilizará como interfaz (Human Machine Interface, HMI) entre el usuario y el sistema empotrado en el quadrotor. En el UCT se ha desarrollado una herramienta que permite un ajuste on-line de los parámetros de control y facilita el hecho de implementar y comparar diversos algoritmos de control.

Con respecto al sistema empotrado, se ha desarrollado una arquitectura en dos capas. El objetivo es que los algoritmos de control más críticos (orientación) se ejecuten sobre un μC (emulando una tarea crítica de un SOTR), dejando las tareas de mayor carga computacional (control de posición, flujo óptico, etc.) y comunicación con la UCT a un mini-PC.

2.1. Arquitectura del sistema empotrado

Los prototipos construidos se componen de tres elementos, que denominaremos: unidades de control, actuadores y elementos de sensorización (figura 1). Se han realizado varias iteraciones en el diseño de la plataforma (dispositivos HW y SO) hasta conseguir una arquitectura lo más simple y sencilla de configurar pero que, a la vez, ofrezca las mejores prestaciones posibles para realizar el control integral de un quadrotor tanto en interiores como en exteriores.

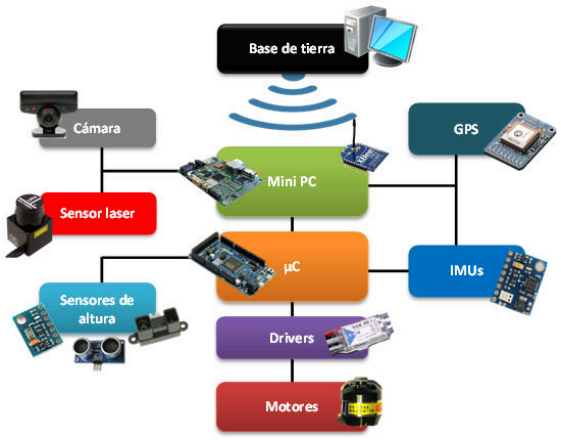


Figura 1: *Sistema empotrado*

Unidades de control

Las unidades de control del sistema empotrado son dos, un mini-PC y un μC. En la versión actual de la plataforma, el mini-PC utilizado es una placa IGEP V2 [10], mientras que el μC es un Arduino Due [9].

La IGEP V2 está provista de un procesador ARM Cortex A8 a 1 GHz, 512MB SDRAM, 512MB NAND Flash, lector de tarjetas micro-SD, USB 2.0, mini USB OTG 2.0, HDMI, Ethernet 10/100, Wi-Fi, RS-232, RS-485, I2C y SPI. Pero lo más interesante, tal vez, es que cuenta con un DSP (digital signal processing), el cual puede resultar muy útil a la hora de realizar el tratamiento de imágenes para la implementación del control de posición x-y mediante flujo óptico, por ejemplo, dado que descarga al procesador de todo el algoritmo de tratamiento de imágenes.

Como Sistema Operativo se ha instalado Linux Ubuntu + Xenomai [12]. El Arduino Due cuenta con un microcontrolador de 32 bits ARM Cortex M3 a 84 MHz, acompañado de 54 pines de entrada/salida digitales, 12 pines de entrada analógicos, 2 pines de salida analógicos, así como periféricos que se encargan de las comunicaciones serie, USB OTG, I2C, SPI e incluso bus CAN.

La figura 2 muestra los diferentes protocolos de comunicación utilizados para conectar los componentes del sistema empotrado entre ellos y con la UCT.

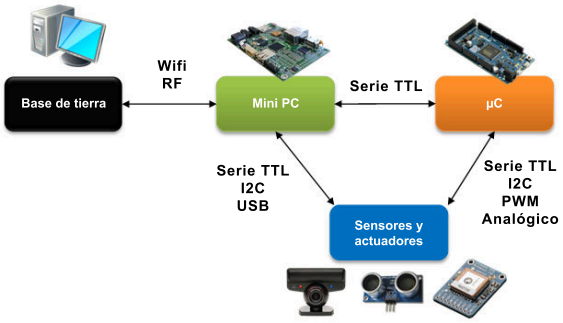


Figura 2: *Arquitectura de las unidades de control*

Actuadores

La plataforma utiliza motores brushless (sin escobillas) de la marca Robbe Roxxy, modelo 2827-35, especialmente pensados para quadrotors. Junto a unas helices 1045 flexibles, cada motor tiene un empuje máximo de unos 600 gramos (5.9 N) y un consumo máximo de 10 amperios.

Para variar la frecuencia de giro de los motores, y en consecuencia la fuerza de empuje que genera cada uno de ellos, se utilizan drivers o ESC (elec-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tronic speed controller). Los drivers utilizados en la plataforma son de la marca YGE [11], modelo 25i.

El diseño actual de la plataforma utiliza señales PWM (pulse-width modulation) para controlar los drivers. Se utiliza un pulso alto entre 1 y 2 ms de ancho, a una frecuencia de entre 200 y 500 Hz, actualmente fijada en 400 Hz. Por lo que esta es la frecuencia máxima de operación de los motores.

Sensorización.

Para poder obtener las distintas variables de estado, se utilizarán diferentes tipos de sensores. Para medir la orientación se utilizan IMUs, equipadas con acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. La IMU hace el tratamiento de los datos, proporcionando directamente la medida de los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) y sus derivadas. Para este proyecto se ha utilizado la IMU *MPU 6050* de InvenSense Inc [13]. El quadrotor incorpora dos IMUs puesto que un fallo en la medida de los angulos sería una situacion critica y puede llegar a provocar un fallo en la ley de control. En una de ellas los angulos de Euler los proporciona directamente el procesador interno de la IMU. En la otra, se ha implementado un codigo que lee directamente las medidas en bruto de los sensores y aplica un filtro de Kalman con las medidas de giroscopos y acelerometros para obtener el pitch y el roll y otro filtro de Kalman con las medidas del giroscopo y del magnetometro [17] para obtener el yaw.

Para el control de posición, es necesario obtener una medida rápida y fiable tanto de la posición en el plano xy como de las respectivas velocidades. El GPS presenta el problema que en interiores no es funcional, ya que no hay visibilidad de los satélites. En el caso de interiores se pueden utilizar distintos sistemas de posicionamiento, la mayoría se basan en el principio de triangularización (Vicon, kinematics, etc.), si bien también es posible realizar un control de posición a partir de dispositivos de barrido laser (SLAM, [2]), o a partir de algoritmos de visión, como es el caso del control x-y por flujo óptico [22], a partir del cual es posible obtener las variables $\dot{x}, \dot{y}$, y a partir de ellas, estimar la posición relativa x-y.

Se ha dotado a la plataforma con un sistema de posicionamiento GNSS/INS. Dicho sistema combina las ventajas del *Sistema Global de Navegación por Satélite* (Global Navigation Satellite System: GNSS) con las ventajas del los *Sistemas de Navegación Inerciales* (Inertial Navigation Systems: INS).
Por un lado los sistemas GNSS dan una posición absoluta que no está sometida a deriva, sin embargo son lentos en cuanto a actualizaciones. Por otro lado los sistemas INS detectan muy bien las variaciones rápidas de posición o velocidad, pero su mayor inconveniente es que estan sometidos a una deriva temporal ya que obtienen la posicion y velocidad por integración de la aceleración.

Actualmente el sistema GNSS más utilizado es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos. El sensor GPS que se ha incorporado es el *Ultimate GPS Breakout v3* de Adafruit [14]. Se ha comprobado experimentalmente que el error de medida de dicho sensor, en un dia despejado, con visibilidad directa al cielo y recibiendo correcciones DGPS está en torno a los 2 m para la posición y a los 0.1 m/s para la velocidad.

El GPS emite la información de posición en formato NMEA, por lo que da medidas de latitud, longitud y de la velocidad en módulo. Las señales de latitud y longitud se han transformado a medidas de posición local x, y (m). También se ha desarrollado un algoritmo que observa las variaciones de x, y y obtiene un coeficiente que pondera la medida del módulo de la velocidad. De esta forma se obtienen también las medidas v_x, v_y. Con esto logramos que el GPS proporcione las 4 coordenadas $(x, y, \dot{x}, \dot{y})$, necesarias para el correcto desarrollo de cualquier algoritmo de control x-y.

Para completar el sistema GNSS/INS se ha implementado un filto de Kalman, en el cual se estiman las medidas del GPS $(\hat{x}, \hat{\dot{x}}, \hat{y}, \hat{\dot{y}})$ integrando las aceleraciones $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ dadas por la IMU, y se corrigen cuando llega una señal GPS útil. El algoritmo de Kalman, como resultado, nos ofrece una estimación de los bias $(\delta a_x, \delta a_y)$ de los acelerómetros ya que han sido debidamente incluidos en el modelo.

Para la medición de la altura "z", los tipos de sensores mas usuales son los infrarojos, ultrasonidos o sensores barométricos. Los primeros se usan para hacer medidas menores de 1,5 metros. Los ultrasonidos proporcionan medidas hasta los 3 o 6 metros dependiendo del tipo del sensor. Su desventaja es su reducido alcance y que dependiendo del tipo de suelo que haya debajo (cesped, una alfombra, etc.) se pueden obtener medidas erroneas.

Por último los sensores barométricos, pueden medir casi cualquier altura, ya que utilizan el cambio de presión en la atmósfera, este tipo de sensores es apto para exteriores, el inconveniente es que no puede detectar los obstáculos que hay debajo del vehículo y que cualquier ráfaga de viento puede generar una sobrepresión o una depresión que genere una medida errónea de altura. Es por esto que la mejor medida consiste en la integración sensorial de distintos dispositivos.

En este proyecto se ha optado por dotar a la plataforma con un sensor barometrico [16] junto a un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

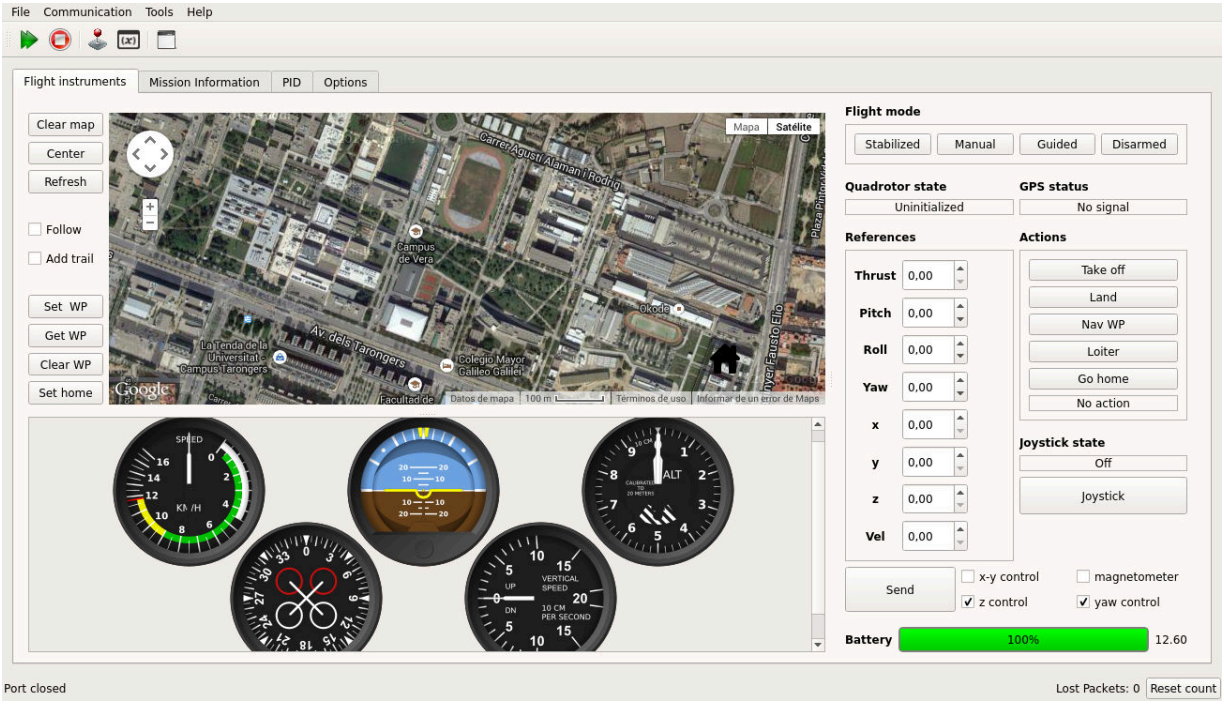


Figura 3: Interface (HMI) para la configuración del control en vuelo libre de un quadrotor.

sensor de ultrasonidos [15] y fusionar las medidas. Se podría haber realizado el control de altura de la plataforma solo con el sensor barométrico pero se optó por incorporar tambien un sensor de ultrasonidos por dar una medida más precisa y fiable que el barómetro a cotas bajas, y así facilitar las maniobras de despegue y aterrizaje.

Como sensor de ultrasonidos se utiliza el *Ultrasonic Distance Sensor* de Parallax. El rango de funcionamiento de este sensor es de entre 2 cm y 3 m.

Para el sensor barometrico se ha optado por el modelo *MS5611-01BA03* de Measurements Specialities. Una de las ventajas que presenta este sensor es que incorpora un sensor de temperatura interno para corregir la medida de presión. Este sensor funciona para rangos de presion entre 10 y 1200 mbar y rangos de temperatura entre -45 y 80 °C. Es la solución mas empleada en quadrotors concebidos para volar en exteriores.

2.2. Comunicación mini PC - UCT e interfaz (HMI)

Además de las unidades de control y sensores presentados anteriormente, resulta imprescindible disponer de un sistema de telemetría entre el mini PC de a bordo y un PC en la unidad de control terrestre (UCT). Este enlace se utiliza tanto para la monitorización de las distintas variables e información proporcionada por los sensores del vehículo, como para el control del mismo.

La plataforma puede comunicarse con la UCT mediante WiFi y radiofrecuencia. Para el enlace WiFi se aprovecha el wifi integrado de la IGEP V2. La transmisión de información se lleva a cabo mediante sockets a través del protocolo TCP. El principal problema es que el alcance está limitado a 10-15 metros y por tanto no sirve para vuelos en exteriores. Para la comunicación por radio se han utilizado dos *Xbee PRO S1* [18] (una conectada por serie al mini PC y la otra directamente conectada a un PC en la UCT). Las Xbee son módulos de radiofrecuencia de bajo coste, bajo consumo y que además permiten crear redes extensibles. La principal ventaja respecto a la comunicación por WiFi es que el alcance puede, teóricamente, llegar a 1,5 kilómetros.

La visualización de todas las variables y constantes de interés, además del control del UAV, se realiza por medio de una interfaz hombre máquina (HMI). Este software ha sido desarrollado en Qt, una biblioteca multiplataforma para desarrollar aplicaciones en C++ con interfaz gráfica de usuario o sin ella y que además cuenta con IDE propio.

Se trata de una interfaz sencilla que cuenta con una ventana principal donde se pueden visualizar las variables más importantes del vehículo y va-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

rios bloques para realizar funciones adicionales. A grandes rasgos, la herramienta disponde de las siguientes funcionalidades:

Sección central con mapa de Google Maps, instrumentos de vuelo en la parte inferior (horizonte artificial, altímetro, brújula, indicador de velocidad en el plano horizontal e indicador de velocidad vertical). Asimismo, en el bloque Mission Information es posible exportar y visualizar estos parámetros en forma de gráficos. En la parte derecha hay un panel para enviar referencias al vehículo, así como cambiar su estado de vuelo. La interfaz también está preparada para recibir información sobre el estado de vuelo o de la cobertura GPS.

Mención aparte merece el bloque dedicado al ajuste online de las constantes de control (proporcional, derivativa e integral). Notar que, dado que los parámetros físicos del quadrotor pueden variar para diferentes configuraciones, el ajuste de los parámetros de control se debe realizar a partir de la experiencia del ingeniero de control realizando pequeños ensayos hasta alcanzar las prestaciones de control deseadas.

Por último, la interfaz también permite al usuario el control del vehículo a través del teclado o de un joystick. En particular, el offset de velocidad de los motores podrá ser controlado mediante teclado, así como las referencias sobre el roll y pitch.

3. Modelado dinámico y algoritmo de control

3.1. Modelo dinámico

Para el cálculo del modelo matemático se utiliza la aproximación de las ecuaciones de Euler-Lagrange [8]. Las coordenadas generalizadas del helicóptero se presentan como:

$$q = (x, y, z, \psi, \theta, \phi) \in R^6 \tag{1}$$

donde (x, y, z) denotan las posición del centro de masas del helicóptero , y (ψ, θ, ϕ) describen los tres ángulos de Euler, que representan la orientación del helicóptero. Después de una serie de cálculos y simplificaciones, el modelo matemático se puede representar como [7]:

$$m\ddot{x} = -u \sin\theta \tag{2a}$$
$$m\ddot{y} = u \cos\theta \sin\phi \tag{2b}$$
$$m\ddot{z} = u \cos\theta \cos\phi - mg \tag{2c}$$
$$\ddot{\psi} = u_\psi \tag{2d}$$
$$\ddot{\theta} = u_\theta \tag{2e}$$
$$\ddot{\phi} = u_\phi \tag{2f}$$

donde m es la masa del helicóptero, g es la aceleración gravitacional, y u el empuje total. Las variables u_ψ, u_θ y u_ϕ se definen como las estradas de control de los ángulos (ψ, ϑ, ϕ), tal que:

$$u_\psi = k_\psi(V_1 - V_2 + V_3 - V_4) \tag{3a}$$
$$u_\theta = k_\theta(V_1 + V_2 - V_3 - V_4) \tag{3b}$$
$$u_\phi = k_\phi(V_1 - V_2 - V_3 + V_4) \tag{3c}$$

Donde k_ψ, k_ψ, k_ψ, son los parámetros de momentos de inercia (normalmente de valor desconocido a priori), y V_1, V_2, V_3, V_4, las tensiones aplicadas a los motores, numerados en orden horario.

3.2. Algoritmo de control

La estrategia de control considerada en este trabajo se ha obtenido como un caso particular de la ley de control propuesta en [23]. La utilización de esta propuesta no lineal, tiene como ventaja que, a parte de su simplicidad, utiliza funciones de saturación para cada estado, lo cual proporciona un fácil ajuste de las ganancias.

De forma general, y para los tres ángulos se propone la siguiente ley de control:

$$\begin{aligned} u_{PD} &= f_{\mathrm{s}}(k_d\dot{\alpha}, \zeta_1) - f_{\mathrm{s}}\Big(k_p(\alpha - \alpha_d), \zeta_2\Big) \\ u_{\mathrm{I}} &= f_{\mathrm{s}}(u_{\mathrm{I}} + k_i(\alpha - \alpha_d), \zeta_3) \\ u_\alpha &= u_{\mathrm{PD}} + u_{\mathrm{I}} \end{aligned} \tag{4}$$

donde $k_d, k_p, k_i, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ son constantes positivas, α es el ángulo considerado, y α_d es el valor del ángulo deseado. f_{s} se define como una función de saturación acotada por los valores $\pm\zeta_i$.

Para asegurar teóricamente la estabilidad global, y para cada una de las variables se tienen que cumplir las siguientes desigualdades $\zeta_2 > \zeta_1$, $k_d^2 > k_p$ (para más detalles ver [23]).

Para pequeñas variaciones en los ángulos de orientación, el control de altura "z" se puede considerar desacoplado del resto de variables, siendo el modelo equivalente un doble integrador, la ley de control utilizada será la misma que se propone en la ecuación 4. Para el diseño del control de posición, es posible reescribir el modelo (2b)-(2c) obteniéndose un desacoplamiento del desplazamiento lateral "y" con respecto al avance "x". Se ha diseñado un algoritmo de control para la posición que permita al quadrotor desplazarse de un punto a otro en línea recta y a una velocidad constante que se le envía como parámetro de entrada. Además independientemente de la orientación ψ.

Si $\mathbf{X_i}=\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$ respresenta una medida de coordenadas cualquiera, en un sistema de referencia con x apuntando al norte e y apuntando al este; y $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} cos\psi & sen\psi \\ -sen\psi & cos\psi \end{pmatrix}$, con ψ definido en el eje z

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

que apunta al centro de la tierra. Entonces:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}'_d \\ \mathbf{X}'_{gps} \\ \dot{\mathbf{X}}'_{gps} \\ \ddot{\mathbf{X}}'_{imu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{R} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{X}_d \\ \mathbf{X}_{gps} \\ \dot{\mathbf{X}}_{gps} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{imu} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Es la transformación que hace que el control x-y sea independiente del yaw. Por otro lado, se definen los valores de saturación de la velocidad según:

$$\zeta_V = \begin{pmatrix} \zeta_{V_x} \\ \zeta_{V_y} \end{pmatrix} = V \cdot \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{y'_d - y'}{x'_d - x'}\right)^2}} \\ \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{x'_d - x'}{y'_d - y'}\right)^2}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

De esta forma se consigue que las referencias de velocidad en cada eje se posicionen en un valor tal que el quadrotor se desplace de (x, y) a (x_d, y_d) en línea recta. Las siguientes ecuaciones muestran la ley de control aplicada:

$$e_V(k) = f_s\left(k_p \cdot \left[\mathbf{X}'_d(k) - \mathbf{X}'_{gps}(k)\right], \zeta_V\right) - \dot{\mathbf{X}}'_{gps}(k)$$

$$u_I(k) = \tfrac{h}{2} \cdot (e_V(k) + e_V(k-1)) + u_I(k-1)$$

$$u_{xy} = \left[k_{dv} \cdot \ddot{\mathbf{X}}'_{gps}(k) + k_{pv} \cdot e_V(k) + k_{iv} \cdot u_I(k)\right]$$

$$\begin{pmatrix} \theta_d \\ \\ \phi_d \end{pmatrix} = f_s\left(u_{xy}, \zeta_\alpha\right)$$

donde las constantes $k_p, k_{dv}, k_{pv}, k_{iv}, \zeta_\alpha$ se corresponden con los parámetros de control y $\mathbf{X}_d$, $\mathbf{X}_{gps}$, $\dot{\mathbf{X}}_{gps}$, $\ddot{\mathbf{X}}_{imu}$ son las coordenadas de posicion deseada, de posición y velocidad dadas por el gps y de aceleración dada por la IMU, respectivamente.

La tensión aplicada a los motores, será el resultado de la suma de las distintas acciones de control sobre los ángulos (ϕ, θ, ψ) y la accion para el control en z:

$$V_1 = u + u_\psi + u_\phi + u_\theta \quad (7a)$$
$$V_2 = u - u_\psi - u_\phi + u_\theta \quad (7b)$$
$$V_3 = u + u_\psi - u_\phi - u_\theta \quad (7c)$$
$$V_4 = u - u_\psi + u_\phi - u_\theta \quad (7d)$$

4. Resultados experimentales

El objetivo de esta sección es la validación y evaluación experimental de la plataforma desarrollada y sus prestaciones.

Las figuras 4 y 5 muestran la evolución de los angulos de orientación Pitch y Roll, y sus respectivas velocidades angulares, durante un vuelo libre a punto fijo a una altura aproximada de un metro. En esta ocasión el algoritmo de control utilizado

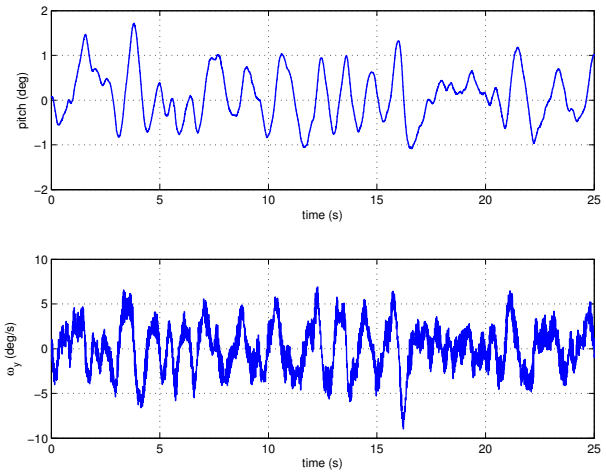


Figura 4: Control del pitch en hover

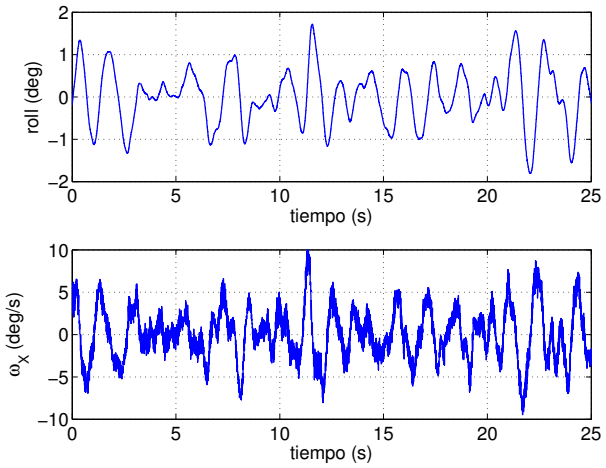


Figura 5: Control del roll en hover

para ambos ángulos es un PID, convenientemente ajustado utilizando la interfaz HMI.

Se observa el buen comportamiento de la plataforma, consiguiendo que ambos angulos esten durante todo el vuelo dentro de un rango de +- 2 grados.

Las figuras 6 y 7 muestran la respuesta de los angulos Pitch y Roll frente a perturbaciones. En este caso el quadrotor esta realizando un vuelo libre a punto fijo cuando se le introducen perturbaciones en los angulos manualmente. El algoritmo de control utilizado para ambos ángulos es un UDE y las figuras destacan su rápida respuesta para volver al vuelo a punto fijo y su gran estabilidad. La figura 8 muestra la evolución de la medida de altura y el valor de la acción de control durante un vuelo a punto fijo durante el cual se ha seguido un patron de referencias de altura para evaluar el algoritmo de control, que en este caso es un UDE. Se observa que se siguen las referencias de forma bastante precisa y rápida.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

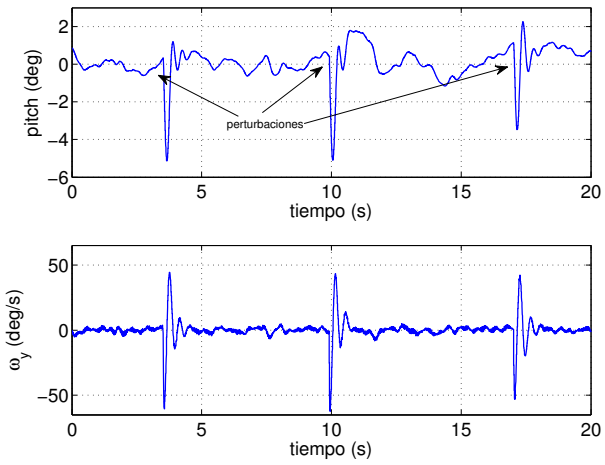


Figura 6: Respuesta en pitch ante perturbaciones

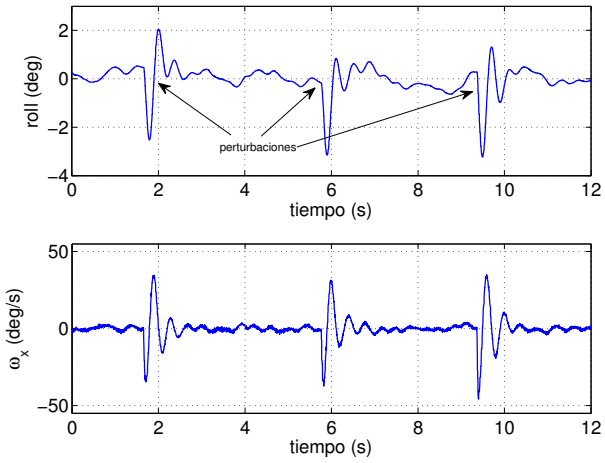


Figura 7: Respuesta en roll ante perturbaciones

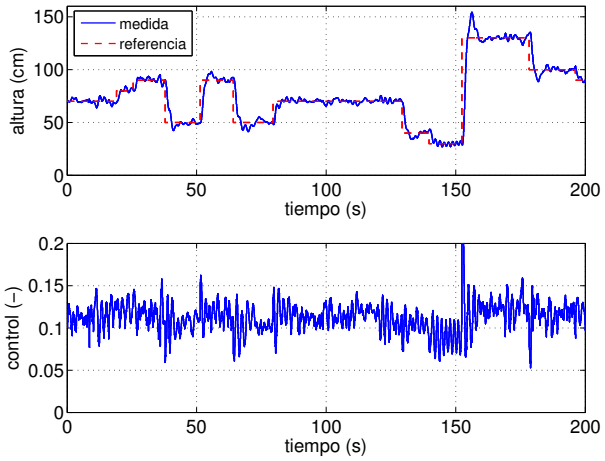


Figura 8: Control de altura siguiendo un patrón de referencias

Las figuras 9 y 10 muestran las medidas obtenidas tras someter al quadrotor a un desplazamiento de unos 25 m en dirección norte-sur.

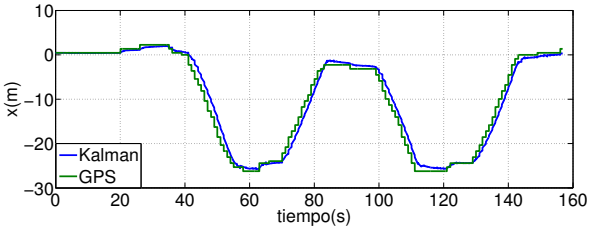


Figura 9: Medida experimental de posición tras efectuar un desplazamiento.

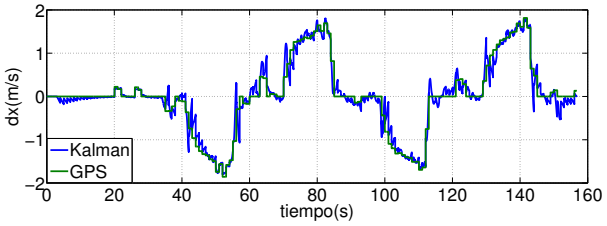


Figura 10: Medida experimental de velocidad tras efectuar un desplazamiento.

Se puede consultar un video del funcionamiento de la plataforma en [30].

5. Conclusiones y trabajos futuros

Para validar la plataforma, se ha desarrollado el control de vuelo tanto en interiores como en exteriores de varios quadrotors, los resultados experimentales, muestran el buen desempeño del sistema propuesto, así como una fácil y sistemática sintonización y evaluación de los algoritmos de control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con fondos pertenecientes al proyecto PROMETEOII/2013/004 de la Generalitat Valenciana, y por el Vicerrectorado de Investigación de la UPV bajo el programa PAID-06-12 ref. SP20120896.

Referencias

[1] L. Acosta, J. Toledo, G.N. Marichal, S. Hernández, J.N. Rodriguez, and S.Torres. Diseño e implementación de una maqueta de un helicóptero de 4 rotores para un laboratorio de control. In *XXV Jornadas de Automática*, Ciudad Real, España, 2004.

[2] P. Agarwal and T. Brady. Slam strategy for an autonomous quadrotor.

[3] P. Balbastre, M. Lluesma, and I. Ripoll. Análisis y compensación de los retardos de planificación en sistemas de control. *RIAII*, 3(2):40–49, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[4] M. Béjar and A. Ollero. Modelado y control de helicópteros autónomos. revisión del estado de la técnica. *RIAII*, 5(4):5–16, 2008.

[5] A. Berna, J. Muñoz, G. Sanahuja, and P. Garcia. Desarrollo de una plataforma para la implementación en tiempo real del control de un mini-helicóptero de 4-rotores. 2010.

[6] J. Borenstein. The hoverbot: An electrically powered flying robot,"`http://www-personal.umich.edu/~johannb/hoverbot.htm`".

[7] P. Castillo, R. Lozano, and A. Dzul. *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*. Springer-Verlag in Advances in Industrial Control, julio 2005.

[8] I. Fantoni and R. Lozano. *Nonlinear Control for Underactuated Mechanical Systems*. Springer-Verlag, 2002.

[9] Site internet de *Arduino*. "`http://www.arduino.cc`".

[10] Site internet de la *IGEP*. "`http://www.isee.biz`".

[11] Site internet de *YGE*. "`http://www.yge.de/artikel.php?search=yge30`".

[12] Site internet *Xenomai*. "`http://www.xenomai.org/index.php/Main_Page`".

[13] Site internet *ImuMPU6050*. "`http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html`".

[14] Site internet *Gps*. "`http://www.adafruit.com/products/746`".

[15] Site internet *Ultrasonidos*. "`http://www.parallax.com/product/28015`".

[16] Site internet *Barometro*. "`http://www.meas-spec.com`".

[17] Site internet *Magnetometro*. "`http://www.aerospace.honeywell.com`".

[18] Site internet *Xbee PRO S1*. "`http://www.digi.com`".

[19] R. Lozano, editor. *Unmanned Aerial Vehicles, Embedded Control*. ISTE-WILEY, mayo 2010.

[20] G.V. Raffo. *Modelado y Control de un Helicóptero Quad-Rotor*. PhD thesis, Master's thesis, Universidad de Sevilla, Dept. Ing. Sistemas y Automática, Sevilla, Spain, 2007.

[21] G.V. Raffo, M.G. Ortega, and F.R. Rubio. Plataforma de pruebas para un vehículo aéreo no tripulado utilizando labview. Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, 2009.

[22] H. Romero, S. Salazar, J. Escareño, and R. Lozano. Estabilización de un mini helicóptero de cuatro rotores basada en flujo óptico y sensores inerciales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(2):49–56, 2010.

[23] G. Sanahuja, P. Castillo, and A. Sanchez. Stabilization of n integrators in cascade with bounded input with experimental application to a VTOL laboratory system. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009. DOI: 10.1002/rnc.1494.

[24] M. Simons. *Model aircraft aerodynamics*. Model and Allied Publications, 1978.

[25] H.J. Sussmann, E.D. Sontag, and Y. Yang. A general result on the stabilization of linear systems using bounded controls. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39:2411–2425, 1994.

[26] A.R. Teel. Global stabilization and restricted tracking for multiple integrators with bounded controls. *Systems and Control Letters*, 18:165–171, 1992.

[27] A.R. Teel. Semi-global stabilization of minimum phase nonlinear systems in special normal forms. *Systems and Control Letters*, 19:187–192, 1992.

[28] A.R. Teel. Semi-global stabilization of the ball and beam using output feedback. In *American Control Conference*, San Francisco, Estados Unidos, 1993.

[29] Boletin Oficial del Estado *25 de julio de 2014*. "`https://www.boe.es/boe/dias/2014/07/05/pdfs/BOE-A-2014-7064.pdf`".

[30] Video del funcionamiento de la plataforma - *DEMO*. "`http://disicom.ai2.upv.es/images/xeon/portfolio/quadrotor-JA.mp4`".

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

PLATAFORMA PARA LA FORMACIÓN PRÁCTICA INDIVIDUALIZADA EN FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Carlos Sánchez Cazorla
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla.
Camino de los Descubrimientos, 41092-Sevilla, España
cscazorla@gmail.com

David Muñoz de la Peña
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla.
Camino de los Descubrimientos, 41092-Sevilla, España
dmunoz@us.es

Fabio Gómez-Estern
Universidad Loyola Andalucía
C/ Energía Solar, 1. Edificios F y G.
Sevilla, España
fgestern@uloyola.es

Resumen

En este trabajo presentamos una plataforma de apoyo al profesor para poder ofrecer formación práctica individualizada en fundamentos de control automático, en particular, en diseño de controladores para sistemas lineales. La plataforma está diseñada para ser utilizada junto con la aplicación Goodle GMS, la cual ofrece servicios de recogida, almacenaje y evaluación automática de ejercicios de alumnos. Usando la plataforma desarrollada, un profesor puede generar de forma fácil y sin tener conocimientos de programación ejercicios individualizados auto-evaluables garantizando la existencia de solución y la homogeneidad en la dificultad y procedimientos de resolución de los mismos. La plataforma ha sido probada en un curso de Fundamentos de Control Automático de la Universidad de Sevilla durante el curso 2013-14.

Palabras Clave: Evaluación automática; Formación individualizada; Aprendizaje basado en proyectos.

1 INTRODUCCIÓN

La plataforma Goodle GMS es un proyecto iniciado en 2007 en el seno del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla que ha dado lugar a numerosos resultados [3,5-7]. En el contexto inicial, se precisaba de una herramienta para lanzar la ejecución en serie de un número considerable de programas Matlab entregados por los alumnos de la asignatura Fundamentos de Informática. El sistema verificaba el correcto funcionamiento de dichos programas mediante un procedimiento de análisis entrada-salida, sin necesidad de analizar en la estructura interna del algoritmo. Pronto se vio la oportunidad de extender esta filosofía al caso en que las entregas de estudiantes no fueran programas Matlab, sino cualquier tipo de respuesta a un problema científico o técnico.

Esta afirmación, que pudiera resultar ambiciosa en una primera impresión, se refiere al hecho de que el propio lenguaje de programación Matlab podría ser empleado para entregar un resultado a un problema científico. En efecto, si un hipotético problema de física se resuelve estableciendo el momento de inercia de un cuerpo o su velocidad, la entrega vía web de su solución se podría hacer habilitando un campo de texto en un navegador donde se mostrara una plantilla del tipo:

```
J=0; % Introducir el momento de inercia en Kg·m
Vfinal=0; % Introducir la velocidad final en m/s
```

Cuadro 1: Código entregado por el alumno como solución a un problema.

El docente ha de preparar esta plantilla, que se mostrará al alumno al entrar en el sistema, y éste reemplazará los ceros por los valores de la solución. De este modo, sustituimos la estructura típica de formulario de campo de textos que requiere una preparación previa del interfaz de entrada para cada

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ejercicio (como sucede en plataformas como Moodle), por la flexibilidad de un único campo de texto, por supuesto a costa de una visualización probablemente más austera.

Pero la verdadera ventaja del enfoque no reside ahí, sino en que la información que introduce en el alumno, ahora es código fuente Matlab (independientemente de que el estudiante sea consciente o no), y por tanto se puede anexar al final una porción de código proporcionada por el profesor al diseñar el ejercicio, para recuperar los valores creados tras la ejecución de dicho código. Para completar el sencillo ejemplo, cabe proponer un breve código Matlab evaluador que verifique que los resultados proporcionados por el alumno son correctos:

```
nota=0;
J_correcta=23.5;
Vfinal_correxta=14.67;
if abs(J-J correcta)<0.01
        nota=nota+1;
end
if abs(Vinal-Vfinal_correcta)<0.01
        nota=nota+1;
end
```

Cuadro 2: Código de evaluación escrito por el profesor.

La ejecución de esta porción de código a continuación de la contribución del alumno generará una variable `nota`, que dependerá de si la solución entregada es correcta. En esencia, la plataforma Goodle GMS implementa esta lógica, con el apoyo de un conjunto de herramientas e infraestructuras informáticas (servidor web, interfaces gráficas, base de datos, sistema de autenticación, etc) que permiten su uso masivo y profesionalizado.

El esquema ilustrado permite a priori introducir cualquier información numérica o alfanumérica como solución a un ejercicio, y procesarla en el servidor como código fuente para ver si corresponde a una solución válida al problema planteado.

Este paradigma es de especial interés en el contexto del control automático por las siguientes razones: a) Muchas soluciones a problemas de control se expresan de forma numérica (constantes de controladores, rangos de los mismos, retardos, características del sistema como tiempos de subida etc.,) y b) la evaluación de una solución de control suele requerir la ejecución de un programa de simulación que valide el comportamiento del programa controlado, que se logra gracias a la flexibilidad del evaluador Matlab programado por el profesor.

A raíz de esta idea, Goodle GMS ha experimentado una considerable expansión en los últimos años, por un lado de la mano de la incorporación de nuevas universidades nacionales e internacionales al proyecto, y por otro a través de mejoras funcionales introducidos por la comunidad vinculada a este trabajo. Dichas mejoras se agrupan en tres áreas:

- Desarrollo de nuevos ejercicios y adaptación a otras áreas.
- Desarrollo de nuevas interfaces de mayor interactividad.
- Utilidades de apoyo a la función docente y la evaluación.

En el primer conjunto ha sido de especial interés la conexión de sistemas de simulaciones interactivas basados en Easy Java Simulations a la plataforma Goodle GMS, evolucionando desde la interfaz texto descrita anteriormente a la potencialidad gráfica y la riqueza de contenidos (a través de repositorios) de las herramientas EJS. Dicha arquitectura basada en el *elememto* denominado AEE, se describe en los artículos [2,9].

En el segundo área lugar, cabe destacar el trasladado de esta arquitectura a numerosos contextos y lenguajes: son los casos de física, teoría del control automático, control óptimo, automatización industrial por PLCs, ingeniería mecánica e ingeniería química (todos a través de Matlab), programación en C, C++ y Java, control de sistemas no lineales en variables de estado (mediante el Matlab Symbolic Toolbox), y otros entornos actualmente en estudio.

Por último, los avances en el sentido de apoyo a la docencia están relacionados con la gestión de la calificación y la diversidad de enunciados. En efecto, al empezar a usar Goodle GMS, se detectó la necesidad de hacer variaciones equivalentes de un mismo ejercicio para que los distintos alumnos tuvieran que resolver problemas ligeramente diferentes (al menos con parámetros diferentes).

Esta idea es fácil de realizar en un contexto de problema científico donde la solución a un problema está vinculada con los parámetros del enunciado mediante una relación funcional explícita (por ejemplo, del tipo *Vfinal=V0+gTfinal*, donde *V0* y *Tfinal* serían los parámetros de entrada, y *Vfinal* la solución buscada). En efecto, si hacemos que *V0* y *Tfinal* dependan de el DNI o número de matrícula, por ejemplo mediante las relaciones

- *Vfinal=120+10*D(1).*
- *Tfinal=500+20*D(2)*

Donde D(1) y D(2) son los dígitos primero y segundo del DNI del alumno. Entonces, cada alumno

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

proporcionará una solución diferente, y el evaluador, con acceso a la base de datos de usuarios y por tanto al DNI, podrá determinar aplicando la fórmula mostrada si el resultado es correcto.

Este paradigma de definición de ejercicios individualizados ha sido de gran utilidad en materias como ingeniería mecánica, química o electrónica. En primer lugar por la relación explícita entre parámetros y soluciones (lo cual no hay que vincular con una menor complejidad del ejercicio, ya que dicha relación explícita puede ocultarse detrás de un complejo análisis matemático). En segundo lugar porque en los ejercicios como el del ejemplo la dificultad no se ve afectada con la variación de los parámetros.

Sin embargo, en control automático no se cumplen esas premisas: los parámetros de entrada de los problemas clásicos (coeficientes de la la planta a controlar y especificaciones de comportamiento) no tienen una vinculación directa (matemáticamente explícita) con la solución al problema, dada por las constantes de ajuste de controladores. Ni siquiera es de esperar que se cumplan las especificaciones mediante una coincidencia numérica, sino mediante una superación de las mismas, lo que admite la existencia de infinitas soluciones a un único ejercicio.

Existe una dificultad adicional en la extrapolación de la arquitectura descrita a la disciplina control automático, y reside en la dificultad de generar enunciados individualizados. En efecto, si hacemos depender del DNI los coeficientes de la función de transferencia en bucle abierto, o las especificaciones, es probable que la dificultad o la propia existencia de solución al problema, varíen con el DNI, y por tanto no se esté planteando el mismo reto a los alumnos.

El problema descrito se ha estudiado a fondo en el contexto de este trabajo, dando lugar a una solución práctica que se ha implementado como una extensión de la plataforma Goodle GMS, incorporando la capacidad de generar un conjunto de enunciados de problemas de control diversos (parametrizados en función del DNI) y equivalentes en dificultad. La nueva herramienta permite al docente crear ejercicios de control individualizados y evaluados automáticamente con sólo seleccionar qué aspectos del curso de control han de ser evaluados (dentro de una lista de especificaciones). Este sistema genera automáticamente los enunciados y los evaluadores, ambos individualizados, y garantiza la solubilidad del problema en todos los casos empleando la misma técnica de control y manteniendo la dificultad uniforme entre los alumnos.

En este artículo se presenta por primera vez la funcionalidad descrita, para lo cual se describirá inicialmente la arquitectura de evaluación automática estándar de Goodle GMS que subyace al sistema propuesto. A continuación se describirá la clase de problemas de control que se desea automatizar, se ilustrará el nuevo interfaz de usuario, y se discutirá la lógica de generación de enunciados y evaluadores bajo la cual se garantiza la equivalencia de los ejercicios. Finalmente, se narra una experiencia práctica llevada a cabo en el aula universitaria.

2 EVALUACIÓN AUTOMÁTICA CON GOODLE GMS

Las ideas presentadas en la introducción se organizan en la Figura 1. En esta imagen encontramos la secuencia en la que se ejecuta el mecanismo de evaluación automática de Goodle GMS.

La plataforma es una aplicación web basada en una base de datos y conectada por TCP/IP o RPC a múltiples aplicaciones, como Matlab, y compiladores Java y C/C. A esta aplicación acceden tres tipos de usuarios: administrador, profesores, y alumnos.

Los administradores configuran los parámetros generales crean y los perfiles de los profesores. A su vez, el papel de estos consiste en definir todos los elementos necesarios para definir un trabajo evaluado automáticamente. Estos parámetros dependen del tipo de ejercicio del que se trate, pero en esencia hay muchas similitudes, y basta ilustrar el caso de los ejercicios de tipo Matlab para comprender el funcionamiento. El profesor ha de crear:

- Un fragmento de código Matlab de pre-evaluación (*Código Inicial* en la Figura 1) cuya finalidad es preparar las variables necesarias para ejecutar el código del alumno (por ejemplo, declarar las variables simbólicas con el comando `sym` o definir constantes físicas, como g=9.81).

- Un código Evaluador (bloque *Evaluador* en la Figura 1) que coincide con el fragmento mostrado en el Cuadro 1. Se ejecuta a continuación del código del alumno (Cuadro 2) para obtener la nota a partir de las variables generadas, tal y como se ilustra en la sección de Introducción. Este fragmento de código puede distinguir unos alumnos de otros y evaluar sus respuestas teniendo en cuenta sus parámetros individualizados.

El resto de los parámetros suministrados por el profesor (bloque *Administración* en la Figura 1), definen detalles de configuración asociados a cómo y cuándo se muestra la información al alumno.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuando el alumno se identifica en el sistema, se visualizan los ejercicios activos que estén asignados a su grupo o clase. Si selecciona uno de ellos, se muestra un enunciado y un interfaz de texto donde debe redactar su solución un formato similar presentada en el Cuadro 1. La solución ha de escribirse en uno de los lenguajes indicados en el bloque *Texto* del área *Estudiante* de la Figura 1, y si se superan los filtros de sintaxis destinados a evitar errores sintácticos (como la ausencia de ";" en C/C++), se incorpora a la base de datos para la posterior evaluación.

Cabe añadir en este momento que el bloque VLab+XML del mismo área representa un mecanismo alternativo asociado al elemento evaluador automático AEE mencionado en la introducción, que permite dotar de evaluación automática a los laboratorios virtuales EJS. La esencia de esta arquitectura consiste en un *plugin* que transcribe automáticamente el contenido completo de un interfaz de laboratorio virtual sobre el que el alumno ha estado trabajando en un fragmento de código equivalente al caso de introducción de código directa por el alumno descrito en la sección anterior.

Sea cual sea el origen de los datos, la Respuesta (bloque color naranja de la Figura 1), está escrita en un lenguaje de programación, filtrada y lista para la ejecución secuencial descrita en el bloque del mismo nombre. El proceso de cálculo de la nota consiste en ejecutar secuencialmente, para cada alumno, el *código inicial*, la *respuesta* del alumno y el *evaluador*, en mecanismo similar al descrito en la introducción, con variantes, que da lugar a una nota que se almacena en la base de datos.

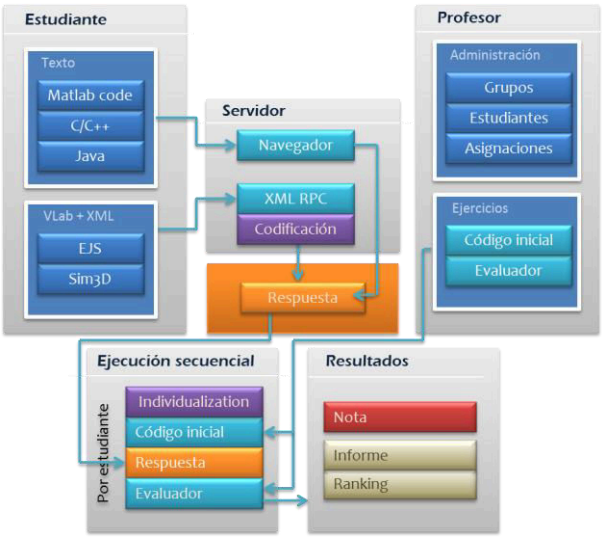


Figura 1: Flujo de información del sistema de evaluación automática Goodle GMS.

El sistema descrito permite su uso en asignaturas de control automático, a partir del esquema que se describirá en la siguiente sección.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA BÁSICO DE CONTROL

El contenido de una asignatura de fundamentos de control es muy amplio [1,4,8], sin embargo una clase de problemas de particular interés, es el del diseño de controladores para sistemas lineales. La plataforma diseñada se centra en una clase de problemas muy concreta, el diseño de controladores para el sistema de control mostrado en la Figura 2. Este problema es relevante para el control de sistemas no lineales en torno a un punto de operación de los que se dispone de un modelo linealizado del mismo en torno a ese punto.

El objetivo es diseñar un controlador lineal descrito por la función de transferencia C(s) de forma que el sistema en bucle cerrado cumpla usa serie de especificaciones, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

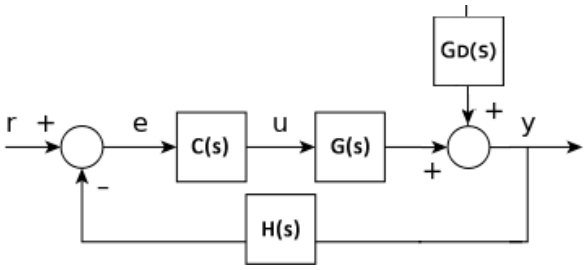


Figura 2: Diagrama de bloques del problema básico de diseño de controladores.

En el domino del tiempo se han considerado especificaciones de sobreoscilación, tiempo de subida y tiempo de establecimiento frente a una referencia en escalón de amplitud unidad. También se han considerado el valor del error en régimen permanente frente a referencias y perturbaciones en escalón, rampa y parábolas de amplitud unidad.

En el domino de la frecuencia se ha considerado límites en la frecuencia de corte, el margen de fase y el margen de ganancia del sistema compensado.

Esta lista no es extensiva, y puede ser ampliada con cualquier tipo de especificación que pueda ser evaluada a partir del diagrama de bloques y de las funciones de transferencia implicadas, tanto de forma explícita como por simulación.

Respecto a los controladores considerados, puede ser cualquier esquema de control lineal que se pueda definir con una función de transferencia. En

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

particular consideramos controladores PID y redes de compensación.

En la herramienta, también se considera la posibilidad de introducir saturación y retardos de transporte en el sistema en bucle abierto, sin embargo en este caso, la generación de parámetros individualizada no está contemplada.

4 GENERACIÓN DE ENUNCIADOS INDIVIDUALIZADOS

Como se ha descrito en la sección anterior, consideramos ejercicios de problemas de diseño de controladores para sistemas lineales definidos por el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2. Un ejercicio está definido por el modelo de los sistemas, las especificaciones y la estructura del controlador. En esta sección presentamos el procedimiento seguido para generar de forma automática el enunciado individualizado garantizando la existencia de solución y la homogeneidad en la dificultad y procedimientos de resolución de los mismos.

En general, la generación aleatoria de sistemas y/o especificaciones no puede garantizar ninguna propiedad respecto a la existencia de solución del problema, ni respecto a los procedimientos para obtenerla. El método propuesto consiste en definir problemas a partir de un problema base proporcionado por el profesor, de forma que sean equivalentes en dificultad y procedimiento de solución. Este procedimiento permite utilizar los ejercicios disponibles en los libros de texto de la materia como por ejemplo [1,4,8].

Una variación acotada suficientemente pequeña de los parámetros de los sistemas y de las especificaciones puede dar como resultado problemas equivalentes, pero no ofrece ninguna garantía y además los problemas pueden resultar demasiado parecidos. En la herramienta desarrollada, hemos seguido otro procedimiento basado en aplicar dos transformaciones que no afecten la naturaleza del problema base, pero sí sus parámetros, en particular, un escalado temporal y un escalado de la ganancia del sistema en bucle abierto. En particular, para generar el sistema de un ejercicio, se definen dos parámetros individualizados de escalado, A y τ. El sistema escalado se define de la siguiente forma:

$$G(s) = A \cdot Gb(\tau s)$$

siendo G(s) la función de transferencia generada a partir de la función de transferencia del problema base Gb(s).

Teniendo en cuenta las propiedades de la transformada de Laplace, esta transformación es equivalente a un cambio en la escala de tiempo de factor τ, es decir,

$$t = tb/\tau$$

siendo t la escala de tiempo del problema generado y tb la escala de tiempo del problema base.

Un escalado en la escala temporal no modifica la naturaleza del problema de diseño, y el escalado de la ganancia del sistema en bucle abierto puede ser compensado por la ganancia del controlador. En particular, se puede demostrar que la ley de control

$$C(s) = Cb(\tau s)/A$$

siendo Cb(s) una ley de control solución del problema base, garantiza que el sistema en bucle cerrado resultante es igual al sistema base en bucle cerrado con el controlador base, pero con un cambio en la escala temporal. Esto implica que si las especificaciones han sido escaladas de forma apropiada, el controlador C(s) cumple todas las especificaciones para la planta modificada. La Tabla 1 muestra la operación escalada para cada una de las especificaciones consideradas.

Tabla 1: Escalado de especificaciones.

Especificación	**Base**	**Escalada**
Sobreoscilación	So	So
Tiempo de subida	Ts	ts*τ
Tiempo de establecimiento	Te	te*τ
Frecuencia de corte	Wc	wc/τ
Margen de fase	Mf	Mf
Margen de ganancia	Mg	Mg
Error en posición	Erp	Erp
Error en velocidad	Erv	erv*τ
Error en posición	Erv	erv*τ^2

5 ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA E INTEGRACIÓN CON GOODLE

En esta sección se describe la plataforma desarrollada y su integración con Goodle GMS. La plataforma desarrollada permite a un profesor de obtener ejercicios personalizados a partir de un problema base. La plataforma web está dividida en cuatro menús.

En el menú *Sistema nominal*, mostrado en la Figura 3, el profesor define las funciones de transferencia del problema base definiendo un vector de coeficientes para cada polinomio en s.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

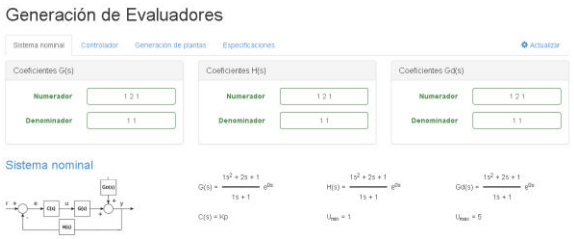


Figura 3: Menú *Sistema nominal*

Figura 4: Menú *Controlador*

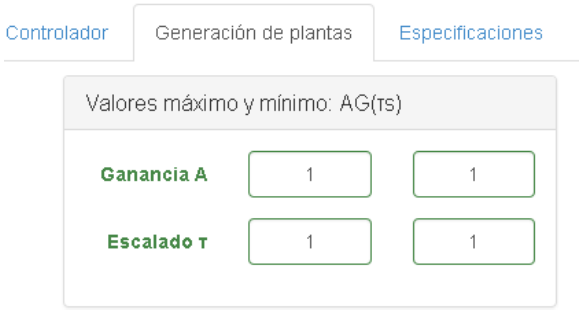


Figura 5: Menú *Generación de plantas*

Figura 6: Menú *Especificaciones*

En el menú *Controlador*, mostrado en la Figura 4, el profesor selecciona el tipo de controlador que tiene que diseñar el alumno entre controladores P, PD, PI, PID, red de avance, red de retraso y red mixta.

En el menú *Generación de plantas*, mostrado en la Figura 5, el profesor define los valores mínimos y máximos de los factores de escalado A y τ.

En el menú *Especificaciones*, mostrado en la Figura 6, el profesor selecciona de una tabla las especificaciones del problema base, indicando los valores máximo y mínimo de una determinada propiedad y el peso en la nota del ejercicio.

Una vez proporcionada la información del problema base y de los límites de escalado, el profesor pulsa sobre el botón de generar y la aplicación devuelve tres códigos de Matlab, el código generador de parámetros, el código evaluador y la plantilla de solución. La Figura 7 muestra parte del código generado por la plataforma.

```
% Inicialización de la semilla para la generación aleatoria
DNI = str2num(dni);
rand('seed',DNI);
A = Amin + (Amax-Amin)*rand(1);
tau = taumin + (taumax-taumin)*rand(1);

% Generación de la planta
for i=1:length(num_pro)
        num(i) = num_pro(i)*tau^(length(num_pro)-i);
end
for i=1:length(den_pro)
        den(i) = den_pro(i)*tau^(length(den_pro)-i);
end
```

Figura 7: Ejemplo de código evaluador generado por la plataforma de forma automática.

Estos códigos de Matlab están diseñados para ser utilizados junto con la aplicación Goodle GMS. Como se ha descrito en la sección de descripción de Goodle GMS, el procedimiento de evaluación consiste en la ejecución sucesiva de código generado por la aplicación, por el alumno y por el profesor. En particular, la aplicación Goodle GMS proporciona de cada alumno, su número de identificación personal (en general el DNI sin letra) en formato cadena de caracteres. Esta es la información utilizada por los códigos de generación de parámetros y de evaluación para individualizar el ejercicio.

El código generador de parámetros es un script de Matlab que solicita por teclado el identificador personal del alumno, y genera un fichero HTML con el enunciado individualizado del mismo. Para generar este fichero de forma aleatoria, pero permitir la repetitividad de forma que el código evaluador pueda corregir el problema partiendo de los mismos parámetros, se utiliza la función `rand` de Matlab, que permite fijar la semilla a partir de la cual se generan secuencias de números aleatorios. Para cada alumno se obtienen los parámetros de escalado a de forma aleatoria utilizando como semilla su número de identificador. Este código hay que compilarlo como fichero .p (de instrucciones ocultas) y proporcionárselos a los alumnos para que cada uno lo ejecute de forma independiente para obtener su ejercicio individualizado.

El código evaluador está definido para insertarlo en un ejercicio de Goodle GMS sin necesidad de modificarlo. Este código recibe el identificador de la base de datos de alumnos para genera los parámetros del ejercicio individualizado. Esto se consigue utilizando de nuevo la función `rand` de Matlab con la misma semilla, de forma que se obtienen los mismos parámetros de escalado. Una vez que se obtiene la planta, se realizan simulaciones y se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

analiza la estructura del sistema en bucle cerrado con el controlador definido por el alumno para comprobar si se cumplen las especificaciones del ejercicio. Para cada especificación, se genera un comentario que indica el valor del controlador proporcionado por el alumno y los objetivos de control. Si la especificación se cumple, se añade a la nota el valor de la misma.

El código plantilla está definido para insertarlo en un ejercicio de Goodle GMS sin necesidad de modificarlo. Este código proporciona una plantilla en el que el alumno proporciona los parámetros de su controlador diseñado.

Creando un ejercicio con el código generado por la plataforma y proporcionando el fichero de Matlab generador de parámetros a los alumnos como enunciado, un profesor puede asignar y evaluar de forma automática un ejercicio individualizado a cualquier número de alumnos. La Figura 8 muestra el flujo de trabajo de la herramienta diseñada, indicando la transferencia de información entre el alumno, el profesor y el servidor. También muestra la necesidad por parte del alumno de ejecutar de forma externa el código de generación de parámetros para obtener su enunciado individualizado.

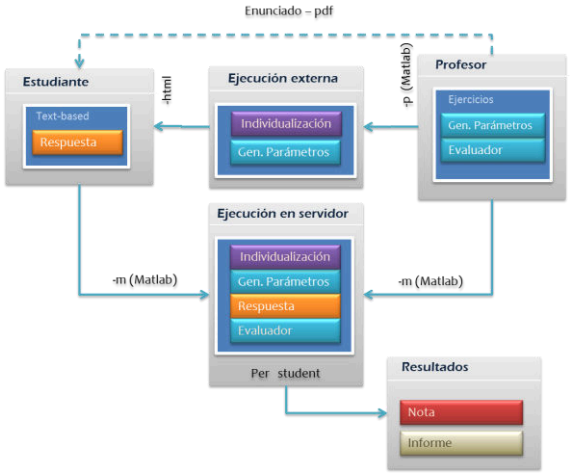


Figura 8: Diagrama de bloques del problema básico de diseño de controladores.

2.7 EXPERIENCIAS EN EL AULA

La plataforma desarrollada ha sido aplicada con éxito en el curso Fundamentos de Control Automático de segundo del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Sevilla durante el curso 2013-14 para asignar y evaluar cinco ejercicios diferentes de diseño de controladores PID a los 453 alumnos matriculados en la asignatura. El servidor Goodle GMS se utilizó para corregir de forma automática las más de 1500 entregas recibidas.

El enunciado individualizado para cada alumno definía el numerador y el denominador del sistema en bucle abierto usando sintaxis Matlab, el tipo de controlador a diseñar y un conjunto de especificaciones. Para el número de identificador 28847022 se generaron de forma automática los siguientes enunciados:

```
Problema 1

Para la planta G1 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 0 332.8 ];
Denominador = [ 0.1461 2.774 8.427 0 ];
diseñe un controlador PD que cumpla las
siguientes especificaciones:

    SO < 20
    Ts (10-90%) < 0.1622

Problema 2

Para la planta G2 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 0 332.8 ];
Denominador = [ 0.1461 2.774 8.427 0 ];
diseñe un controlador PID que cumpla las
siguientes especificaciones:

    SO < 20
    Ts (10-90%) < 0.1622

Problema 3

Para la planta G3 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 0 -3.328 ];
Denominador = [ 0.1461 3.051 13.69 16 ];
diseñe un controlador PD que cumpla las
siguientes especificaciones:

    Mf > 30
    Wc > 11.3925

Problema 4

Para la planta G4 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 0 -3.328 ];
Denominador = [ 0.1461 3.051 13.69 16 ];
diseñe un controlador PID que cumpla las
siguientes especificaciones:

    Mf > 40
    Wc > 9.4937

Problema 5

Para la planta G5 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 20.8 ];
Denominador = [ 0.2774 5.793 10 ];
diseñe un controlador PI que cumpla las
siguientes especificaciones:

    Mf > 20
    Evrp < 0.0053
```

Cada problema es resoluble y tiene un procedimiento de solución diferente definido por los cinco problemas base utilizados para definir los ejercicios.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El proceso de asignación, recogida y evaluación de resultados fue llevado a cabo sin ningún problema y los alumnos generaron de forma apropiada sus enunciados.

Para cada alumno, el evaluador generó además de la nota, una serie de comentarios con el análisis del controlador entregado. A continuación se muestra el comentario generado para uno de los cinco problemas.

```
Para la planta G2 definida por los
siguientes polinomios:
Numerador = [ 0 0 0 462.3 ];
Denominador = [ 12.45 53.73 37.09 0 ];
los resultados del controlador diseñado son:
SO = 17.2497. Sí cumple la especificacion SO
< 21.00
Ts(10-90%) = 0.4355. Sí cumple la
especificacion Ts(10-90%) < 0.75
Nota: 1.0
```

En general, para los profesores involucrados en la asignatura el resultado de la experiencia ha sido muy positivo. La posibilidad de generar de forma automática enunciados a partir de un ejercicio base permite reutilizar colecciones de ejercicios ya diseñados para el curso concreto, de forma que cada alumno los afronte de forma individual, permitiendo una renovación de los contenidos de la asignatura.

2.7 CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos una plataforma de apoyo al profesor para generar de forma sencilla ejercicios de diseño de controladores individualizados auto-evaluables con Goodle GMS a partir de enunciados ya existentes. Mediante un escalado temporal y de ganancia, se garantiza que todos los ejercicios generados son de naturaleza equivalente al problema original. La plataforma permite utilizar material de cursos bien establecidos, de forma individualizada y autoevaluada, facilitando la aplicación de metodologías docentes basadas en la resolución de ejercicios prácticos sin necesidad de tener conocimientos de programación para desarrollar evaluadores.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Sebastián Dormido, Gonzalo Farias y Luis de la Torre por sus útiles comentarios y colaboraciones en el contexto del desarrollo de esta herramienta.

Asimismo desean agradecer al Vicerrectorado de investigación de la Universidad Loyola Andalucía por financiar la participación en este congreso.

Referencias

[1] Dorf, R.C. and Bishop, R.H., (2005) Sistemas de Control Moderno 10ED, Pearson, Inglaterra.

[2] G. Farias, F. Gomez-Estern, L. De la Torre, D. Muñoz de la Peña, C. Sánchez, S. Dormido. Enhancing Virtual and Remote Labs to Perform Automatic Evaluation. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education. 2012.

[3] F. Gómez-Estern, M. López-Martínez, D. Muñoz de la Peña. Sistemas de Evaluación Automática Vía Web en Asignaturas Prácticas de Ingeniería. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Vol. 7. Núm. 3. 2010. Pag. 111-119.

[4] Guzmán, J.L, Costa, R., Berenguel, M., Dormido, S., (2012) Control automático con herramientas interactivas, Pearson, Inglaterra.

[5] M. López-Martínez, F. Gómez-Estern, D. Muñoz de la Peña. Automatic Web-Based Evaluation of C-Programming Exercises in Engineering Education. International Journal for Knowledge, Science and Technology. Vol. 1. Núm. 2. 2010. Pag. 1-6.

[6] A. Muñoz de la Peña, D. González-Gómez, D. Muñoz de la Peña, F. Gómez-Estern, and M. Sánchez. Automatic Web-Based Grading System: Application in an Advanced Instrumental Analysis Chemistry Laboratory, Journal of Chemical Education Vol. 90, Pag. 308-314, 2012.

[7] D. Muñoz de la Peña, F. Gómez-Estern, S. Dormido. A new Internet tool for automatic evaluation in Control, Systems and Programming, IEEE Computers & Education Vol. 59, Pag. 535-550, 2012.

[8] Ogata, K., (2011) Ingeniería de Control Moderna 5ED, Pearson, Inglaterra.

[9] C. Sánchez, F. Gómez-Estern, D. Muñoz de la Peña. A virtual lab with automatic assessment for nonlinear controller design exercises. 9th IFAC Symposium Advances in Control Education. 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

PRIMEROS RESULTADOS DE UN CONTROL GENÉTICO PREDICTIVO SOBRE MAQUETA DE HELICÓPTERO (TWINROTOR)

Asier Gutierrez
agutierrez059@ikasle.ehu.es

Eloy Irigoyen, Ekaitz Larzabal, Juan José Valera, Mikel Larrea
{eloy.irigoyen, ekaitz.larzabal, juanjose.valera, m.larrea}@ehu.es

UPV/EHU, ETSI de Bilbao, DISA, Alda. Urquijo s/n

Resumen

Este trabajo presenta nuevos resultados, tanto a nivel de simulación, como sobre sistema real, de una novedosa propuesta de Control Inteligente denominada iMO-NMPC. Dicha propuesta integra estrategias de Control Predictivo con técnicas de Soft Computing con objeto de resolver complejos problemas de control sobre procesos reales, acometiendo dichos problemas en toda su extensión. Para realizar las pruebas de experimentación con iMO-NMPC se ha utilizado una maqueta real de un sistema de dos rotores (Twin Rotor) proporcionada por FeedBack Instruments Ltd. Además, dichas pruebas se han llevado a cabo bajo consideraciones de control en Tiempo Real, por lo que ha sido especialmente crítica la definición de los tiempos de muestreo, para los cuales el sistema debe de quedar controlado, pero en los cuales las técnicas de Soft Computing empleadas (Algoritmos Genéticos y Redes Neuronales Artificiales) han debido desarrollarse de una forma satisfactoria. Los resultados que se presentan en este trabajo muestran de forma preliminar la posibilidad de utilizar la estrategia de Control Inteligente iMO-NMPC, para sistemas de dinámicas complejas y bajo condiciones temporales restrictivas.

Palabras clave: Control Inteligente, Sistema iMO-NMPC, Modelo Neuronal, Algoritmo NSGA-II, Twin Rotor.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio y diseño de nuevas estrategias de control que ofrezcan soluciones eficientes, precisas y optimizadas ante problemas de control aparecidos en sistemas/procesos industriales, manteniendo toda la complejidad del problema a tratar, continúa siendo un importante reto y una oportunidad de búsqueda de nuevas propuestas mejoradas. En dichos estudios se pretenden abordar situaciones donde se consideren al máximo las no linealidades de los sistemas, las dinámicas acopladas que existan, la competencia entre diferentes objetivos contrapuestos, la aleatoriedad, la incertidumbre, las perturbaciones e inferencias ruidosas, en definitiva, todas aquellas características inherentes en los procesos reales [15] y [24].

En ese sentido, las técnicas de *Soft Computing* se presentan como una alternativa muy apropiada para la resolución de dichos problemas de optimización y control, los cuales muestran altos niveles de complejidad en su resolución [1] [13] [10]. Además, en la actualidad se están encontrando trabajos donde la hibridación de tecnologías y de disciplinas está ofreciendo soluciones cada vez más satisfactorias, optimizadas y de gran valor añadido [12] [4].

En la fase de diseño conceptual de estos problemas de control, la formalización matemática de los problemas de optimización se hace muy difícil de formular, llegando a presentar en los casos en que se puede llevar a cabo no linealidades fuertes, con discontinuidades en su rango de actuación, problemas no convexos, no cuadráticos, en resumen, problemas muy complejos de resolver. En estas circunstancias no se encuentra una solución analítica directa o explícita del problema, teniendo que recurrirse a planteamientos simplificados, linealización de los mismos, transformaciones y/o reducciones de orden, en definitiva, una pérdida de la riqueza en la solución final. Además, a todas estas circunstancias se le puede sumar como dificultad añadida la necesidad de balancear entre múltiples objetivos contrapuestos.

Es una realidad el hecho de que en los sistemas de control de procesos industriales reales deba existir un controlador que opere en línea (*'on-line'*). Hasta día de hoy se han desarrollado muchas soluciones apoyadas en la teoría clásica de control, donde se han logrado soluciones muy robustas y eficientes. Pero por la naturaleza compleja de los problemas de control, para la utilización de dichas técnicas clásicas se han llevado a cabo simplificaciones y premisas que garantizan un funcionamiento del proceso óptimo y estable en un entorno conocido del punto de trabajo donde se realiza el control. Esto, obviamente, dificulta enormemente el problema de control si se atiende a la respuesta del sistema en regímenes de operación ampliamente variables.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

A fin de abordar los problemas complejos de control, los ingenieros de control se han inspirado en el comportamiento del ser humano con el objetivo de trasladar cierta "inteligencia" al lazo de control [19]. Ante una determinada tarea, el ser humano trata de predecir cuál sería el resultado final tras tomar una decisión entre las posibles opciones de acción que puede construir. Esta valoración la realiza en base a los objetivos que desea alcanzar. Mediante esta "inteligencia" al sistema de control se le dota de capacidad de aprendizaje, adaptación, anticipación, predicción, intuición y hasta razonamiento en algunos casos. La utilización de las técnicas de *Soft Computing* permiten sacar rendimiento al concepto de tolerancia a la imprecisión, aspecto clave en la fundamentación y diseño de estrategias de control inteligente. Aunque actualmente es imposible reproducir íntegramente el comportamiento humano, estas técnicas permiten conferir a los sistemas de control de cierta inteligencia y capacidad de razonamiento, llegando a soluciones optimizadas en los entornos en los que deben trabajar [18].

Una estrategia de control predictivo multiobjetivo, resuelta en base a un modelo no lineal del proceso, podría contener adecuadamente todas estas premisas de pseudo-inteligencia. De este modo se podría alcanzar el comportamiento óptimo del sistema, mediante un mecanismo predictor-evaluador de objetivos sobre un horizonte temporal seleccionado. Esta estrategia debería contener una fase evaluación de múltiples acciones de control con objeto de seleccionar las mejores según los objetivos considerados, apoyada en una fase de decisión experta que dictamine qué solución es la que ofrece un buen compromiso entre dichos objetivos.

El principal inconveniente que aparece a la hora de llevar a cabo este planteamiento de control inteligente es lograr ejecutarlo en tiempo real. El uso de las técnicas de *Soft Computing* en aplicaciones de control en tiempo real, especialmente en procesos críticos y seguros, está todavía muy poco extendido. Aunque los grandes avances en microelectrónica y en sistemas de computación abre un nuevo horizonte donde se plantea como nuevo reto en la actualidad el lograr integrar estas técnicas, con objeto de abordar problemas de control complejos.

En este trabajo se utiliza una estrategia de control que integra diferentes técnicas de *Soft Computing* en conjunción con fundamentos de otras técnicas de control avanzado como es el Control Predictivo, denominada *"iMO-NMPC"*. Dicha estrategia se presenta en la sección 2, donde se ofrecen detalles más concretos de cada uno de sus componentes. Específicamente, en dicha estrategia híbrida se utilizan las Redes Neuronales Artificiales como mecanismo de identificación y modelado de sistemas multivariables con comportamientos no lineales y que presenten acoplamientos entre sus diferentes variables. Todo ello se presenta en la sección 3 de este trabajo. Con objeto de evaluar la mencionada estrategia se han llevado a cabo una serie de experimentos simulados y sobre plataforma real que son mostrados en la sección 4. Finalmente se plantean las conclusiones obtenidas y las líneas futuras que deja abiertas el presente trabajo.

2 iMO-NMPC

En el contexto de la estrategia de control predictivo es necesario el empleo de técnicas de optimización para la búsqueda de una solución dentro de la función objetivo propuesta. Cuando la planta a controlar es de tipo no-lineal se emplean técnicas de programación cuadrática tales como Secuential Cuadratic Programing (SQP) [21][20]. En el problema de la búsqueda del óptimo en sistemas complejos no-lineales multiobjetivo es posible seleccionar otras técnicas distintas a la anterior para la obtención de la solución no-inferior (Pareto). En la actualidad una de las técnicas disponibles está basada en algoritmos evolutivos (AE) como es el Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) [3]. En la idea de emplear AE como optimizador Valera et. al. [23] presentan el algoritmo iMO-NMPC para el control de sistemas no-lineales multiobjetivo con la ayuda de técnicas de *Soft Computing*.

Dentro de los esquemas de control predictivo existen algunos basados en modelos lineales como el MPC (Model Predicitve Control) o estrategias que trabajan con modelos no-lineales. El esquema de control predictivo basado en modelo o MPC es una estrategia de control predictivo en el que se emplea un modelo lineal de la planta objeto de control en el que se obtiene una solución óptima de control. Este tipo de controles tienen la ventaja de que pueden ejercer el control de plantas con retardos, anticiparse a los acontecimientos, control multivariable y considerar restricciones. En el caso de que el sistema a controlar tengas considerables no-linearidades es preciso dar un paso mas y hacer uso de técnicas de control no-lineal como es Nonlinear Model Predictive Control (NMPC). Esta técnica requiere algoritmos de optimización mas complejos como los SQP o algunas de sus variantes que requieren un alto costo computacional. Debido a esto estas soluciones no se consideran cuando el sistema a controlar tiene unas dinamicas rapidas.

El sistema de control iMO-NMPC contiene una estrategia englobada dentro de las técnicas de con-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

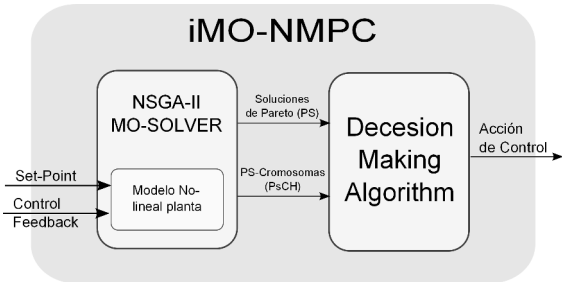


Figura 1: Esquema del sistema de control iMO-NMPC.

trol predictivo no lineal. El iMO-NMPC trabaja con problemas de optimización multi-objetivo con sistemas no-lineales multivariables, funciones de coste de tipo no cuadráticas, no convexas y no agregados. Para la aproximación del modelo no lineal se utiliza una RNA. Como optimizador el esquema de control emplea un Algoritmo Genético Multi-Objetivo (MOGA) como optimizador de la fucnión de coste. Como resultado de este proceso de optimización se dispone un conjunto de soluciones del que se selecciona la mejor para emplearla como acción de control por el Decision Making Algorithm. Como representación esquemática de este sistema se presenta la figura 1.

Un requerimiento importante de este controlador es la necesidad de disponer de un modelo de la planta a controlar para poder realizar las predicciones del lazo de control sobre el horizonte de control. Una de las opciones es recurrir al modelado matemático basado en conocimiento, pero usualmente esto no es posible debido a la complejidad de los sistemas objeto de control. Entre las distintas alternativas presentes en la literatura encontramos las RNA. Entre la ventajas que proporcionan las RNA esta la capacidad de aproximar sistemas no-lineales basándose en las relaciones entrada/salida obtenidas de forma experimental. Adicionalmente, si el sistema es muy complejo puede representar una solución de menor coste computacional frente a modelos matemáticos. Este último aspecto puede ser de gran importancia cuando se pretende realizar un control del sistema en tiempo real.

En el caso del algoritmo que debe de resolver las funciones de coste no cuadráticas, no convexas, no agregadas se hace uso del algoritmo NSGA-II propuesto por Deb en [3]. Se emplea este algoritmo frente a los otras opciones existentes dentro de los AE por su mecanismo de elitismo, por la rápida convergencia y por la calidad de sus resultados [23]. El funcionamiento de este algoritmo se describe en mayor detalle en [3]. El algoritmo de optimización debe de resolver el problema definido en el horizonte de control definido para obtener el mejor conjunto de acciones en función de los objetivos de control (uno o varios) en cada instante de muestreo. Como solución de este problema devolverá un conjunto de soluciones pertenecientes al frente de Pareto [16].

La selección de la acción de control se realiza mediante un algoritmo de toma de decisión o Decision Making Algorithm (DMA). Para seleccionar una solución del frente de Pareto se puede emplear ciertos criterios como la mínima distancia al origen de coordenadas [11] u otorgar un peso a cada función de coste. Frente a los criterios basados en reglas heurísticas tenemos los basados en reglas Fuzzy o sistemas de inferencia Fuzzy [23]

3 NARX COMO MODELO NEURONAL

A día de hoy las redes neuronales artificiales (RNA) (figura 2) han demostrado con creces sus capacidades a la hora identificar distintos tipos de plantas [14] [22]. Desde que autores como Hornik et. al. [8] y [7] o Funahashi [6] o Cybenko [2] demostraron que las RNA multi-capa de una sola capa oculta son aproximadores universales el uso de las redes neuronales artificiales para identificar cualquier tipo de sistema se ha incrementado. Una de las principales razones se debe a que en caso de sistemas complejos desde el punto de vista matemático suelen requerir mucho esfuerzo a la hora de modelar. Con las técnicas de identificación basadas en RNA suele ser relativamente sencillo obtener un modelo de la planta que se desea identificar con la precisión que se neesite. Usualmente a las técnicas que emplean las RNA para la identificación suelen llamarse identificación de tipo caja negra en cuanto no se conoce nada sobre la dinámica de la planta o caja gris cuando se tiene un conocimiento parcial de la misma.

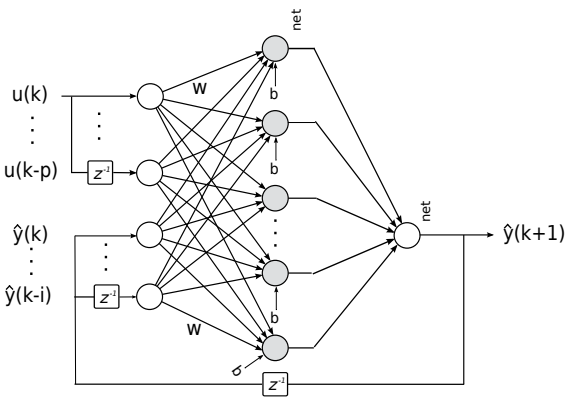


Figura 2: Esquema de una red neuronal recursiva

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

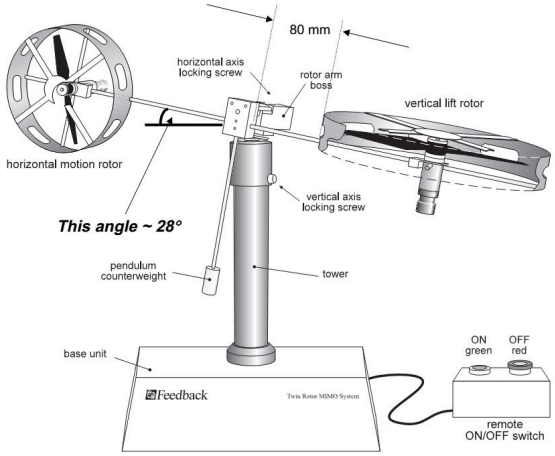


Figura 3: Maqueta de un helicóptero para pruebas de prototipado rápido. Feedback Instruments Ltd. [5]

La planta seleccionada para ser controlada es un prototipo de helicóptero en forma de maqueta de laboratorio como se puede apreciar en la figura 3. Dentro de las características de esta planta se encuentra su alta no linealidad junto con el acoplamiento entre sus entradas/salidas. Este tipo de plataformas son habituales como objeto de control de distintas estrategias de control ya que se considera técnicamente complejo [17] [9].

Para la aproximación no-lineal de la planta se ha optado por una Red Neuronal Artificial Recurrente de tipo Multilayer Perceptron. El proceso de aproximación se ha dividido en tres fases. En una primera aproximación se procedió a identificar el movimiento en el eje horizontal o Yaw. Debido a que el aclopamiento en este caso no es significativo se ha optado por realizar una identificación SISO del sistema. La estructura de la red definida es 5-12-1. Dos de las entradas corresponden a la señal del motor del rotor de cola con un retardo temporal y las otras tres señales corresponden a la realimentación de las salidas del sistema (Yaw) y sus retardo. Las neuronas de la capa oculta poseen unas funciones de activación sigmoidales, a su vez, en las neuronas de la capa de salida la función de activación es de tipo lineal. Para el entrenamiento se ha empleado en algoritmo Levenberg-Marquardt. El resultado de la aproximación se puede observar en la figura 4.

En la aproximación de la señal de salida para el eje vertical (Pitch) el acoplamiento es lo suficientemente considerable. En este caso el sistema se ha identificado como un sistema MISO en donde la acción de control en el rotor principal, junto al cabeceo del helicóptero en los instantes anteriores son las entradas del modelo aproximado, siendo el movimiento en eje vertical la salida (pitch). En

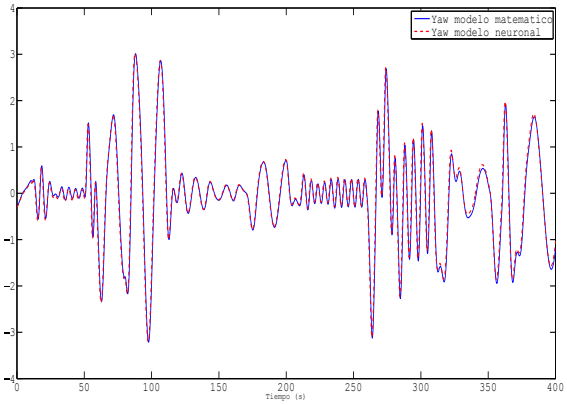


Figura 4: Resultados de la identificación del sistema (Guiñada).

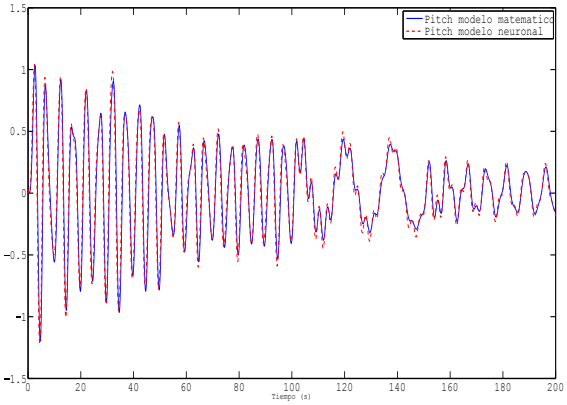


Figura 5: Resultados de la identificación del sistema (Cabeceo).

este caso la estructura de la red que se ha definido es 8-25-1. Como en el caso anterior las funciones de activación de la capa oculta son de tipo sigmoidal y de tipo lineal en la capa de salida. El resultado de la aproximación se puede observar en la figura 5.

En el caso de la identificación del sistema completo con una sola RNA recurrente se ha hecho uso de una red con una estructura 14-30-2. En dicha red las neuronas de la capa oculta tienen como función de activación el tipo sigmoidal y en la capa de salida es de tipo lineal. Como se puede observar en la figura 6 es posible obtener una aproximación con la suficiente precisión en la identificación de la planta.

4 RESULTADOS DEL CONTROL iMO-NMPC

Los experimentos para analizar y validar el funcionamiento del sistema de control iMO-NMPC se han realizado en el entorno de simulación Matlab/Simulink. Posteriormente, dando un paso

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

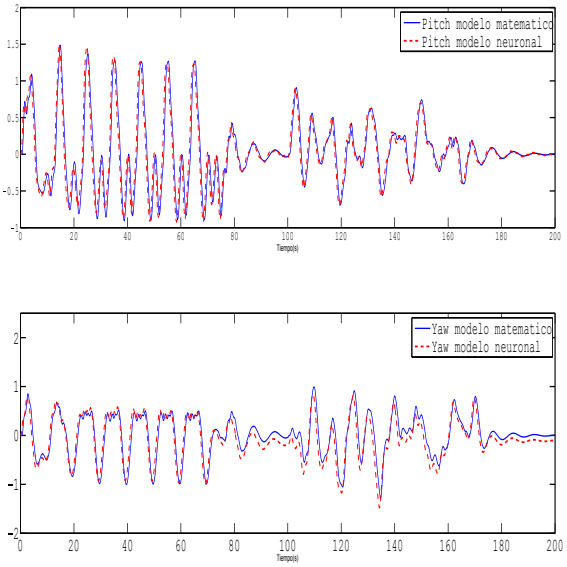


Figura 6: Resultados de la identificación del sistema (Cabeceo y guiñada).

más, se han realizado experimentaciónes con la maqueta real del sistema. Para las pruebas que se han realizado con la maqueta se ha empleado un PC genérico con un procesador Intel Pentium D a 3.5GHz y 1.5GB de memoria RAM. Para manejar las señales de estradas/salidas se ha hecho uso de la tarjeta de adquisición de datos PCI 1711 de Advantech. El controlador ha sido ejecutado sobre el sistema Real-Time Windows Target que proporciona Matlab.

Los ensayos se han realizado con un periodo de muestreo de 20 milisegundos con la intención de obtener una dinámica representativa de la planta y que a su vez al sistema iMO-NMPC le dé tiempo de ejecutar con garantías de obtener un resultado válido. En ambos casos la señal de referencia ha sido un tren de pulsos de amplitud 0.2 radianes y periodo de 80 segundos con un ciclo del 50%. El modelo de la planta que emplea el controlador es un modelo matemático ya que no se ha podido completar la ejecución del algoritmo en la plataforma de control debido a sus limitaciones a la hora de ejecutar el algoritmo en tiempo real.

En la figura 7 se puede observar el resultado del control sobre el helicóptero en una simulación numérica. Como se aprecia en la gráfica la respuesta presenta un sobreimpulso del 40% y un rizado del 5% en el estacionario. En vista de los resultados se puede considerar que el sistema está controlado, aunque no de forma óptima, quedando por incorporar nuevos avances en la forma de implementar el sistema de control iMO-NMPC.

En caso de la prueba realizada sobre la maqueta (ver figura 8) se puede apreciar que la oscilacón es

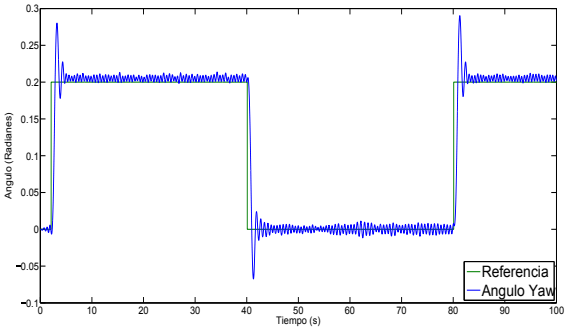


Figura 7: Resultados del control en entorno de simulación.

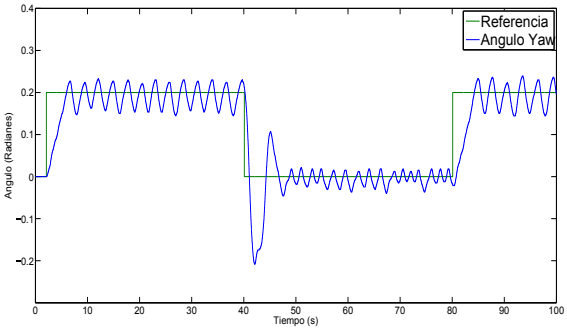


Figura 8: Resultados del control sobre la maqueta del helicóptero.

considerablemente mayor. En este caso se aprecia que la planta no presenta la misma dinamica en ambos sentidos del giro por lo que cuando el giro se realiza en sentido negativo aparecen mayores oscilaciones. De nuevo quedan retos pendientes de cara al desarrollo de nuevas soluciones sobre aplicaciones de control en plataformas reales.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado nuevos resultados utilizando el sistema de control inteligente iMO-NMPC sobre una planta de características dinámicas relativamente complejas, como es el sistema de dos rotores 'Twin Rotor' comercializado por Feedback Instruments Ltd. Esta plataforma se ha elegido por ser utilizada ampliamente en nuevos desarrollos y estrategias de control. El desarrollo del presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar la viabilidad del sistema iMO-NMPC en condiciones de trabajo realmente complejas, por lo que no es objetivo del mismo establecer comparativas con otras estrategias de control. El sistema evaluado y validado deberá ser posteriormente mejorado para lograr establecer las comparaciones oportunas.

El proceso de experimentación llevado a cabo se ha desarrollado en dos fases bien diferenciadas. En

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

una primera fase se han realizado pruebas de simulación para completar la implementación del algoritmo de control sobre soluciones analizadas con MATLAB/SIMULINK, configurando un sistema de control en lazo cerrado con un modelo de la maqueta multivariable Twin Rotor. En trabajos previos se había trabajado con sistemas de prueba SISO, habiéndose dado un paso importante en este trabajo para la utilización del sistema iMO-NMPC en sistemas multivariables. Posteriormente, en una segunda fase, se han implementado soluciones donde se incluye la plataforma real, haciéndose pruebas en este caso con las herramientas Real-Time Windows Target y xPCTarget de Mathworks. Los resultados presentados ofrecen datos muy esperanzadores en la línea de posibilitar la utilización del sistema iMO-NMPC en procesos reales, bajo condiciones de soluciones de control en Tiempo Real.

Las características del sistema iMO-NMPC requieren de un modelo neuronal, por lo que en este trabajo ha sido de gran relevancia la selección y entrenamiento de una Red Neuronal Artificial Recurrente para reproducir las complejas dinámicas de la plataforma Twin Rotor a lo largo de sus diferentes puntos de trabajo. De igual manera, debido a que para realizar la evaluación de las soluciones óptimas que cumplan con un conjunto de objetivos contrapuestos se ha utilizado un Algoritmo Genético, en su tipología NSGA-II, ha sido necesario trabajar sobre los parámetros asociados al mismo, con el objeto de mejorar los procesos de optimización que es capaz de llevar a cabo bajo estas condiciones complejas de control.

A pesar de que los resultados no ofrecen inicialmente un buen control de la plataforma Twin Rotor, se ha abierto una línea de trabajo donde estudiar, implementar y desarrollar soluciones más completas que puedan satisfacer las condiciones temporales de sistemas reales con dinámicas tan rápidas. En este caso se está tratando con dinámicas que requieren acciones de control por debajo de los 10 milisegundos.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración prestada por parte de los miembros del Grupo de Investigación de Control Inteligente de la UPV/EHU. Así mismo quieren agradecer la ayuda concedida por parte del MINECO a través del proyecto DPI2012-32882 "Control de posición-fuerza en tiempo real basados en modelos elásticos para aplicaciones de alto rendimiento de los robots paralelos".

Referencias

[1] P. P. Bonissone. Soft computing: the convergence of emerging reasoning technologies. *Soft Computing*, 1:6–18, 1997.

[2] G. Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems (MCSS)*, 2:303–314, 1989.

[3] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 6(2):182 –197, 2002.

[4] M. Dendaluce, J. Valera, V. Gómez-Garay, E. Irigoyen, and E. Larzabal. Microcontroller implementation of a multi objective genetic algorithm for real-time intelligent control. In *International Joint Conference SOCO'13-CISIS'13-ICEUTE'13*, volume 239 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 71–80. Springer International Publishing, 2014.

[5] E. S. Feedback Company. *TRMS 33-220 User Manual,3-000M5*, 1998.

[6] K.-I. Funahashi. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks*, 2(3):183 – 192, 1989.

[7] K. Hornik. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 4(2):251 – 257, 1991.

[8] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 3(5):551 – 560, 1990.

[9] J.-G. Juang, M.-T. Huang, and W.-K. Liu. Pid control using presearched genetic algorithms for a mimo system. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 38(5):716–727, 2008.

[10] M. Ko, A. Tiwari, and J. Mehnen. A review of soft computing applications in supply chain management. *Applied Soft Computing*, 10(3):661 – 674, 2010.

[11] K. Laabidi, F. Bouani, and M. Ksouri. Multicriteria optimization in nonlinear predictive control. *Mathematics and Computers in Simulation*, 76(5-6):363–374, 2008.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[12] E. Larzabal, J. Cubillos, M. Larrea, E. Irigoyen, and J. Valera. Soft computing testing in real industrial platforms for process intelligent control. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 188 AISC:221–230, 2013.

[13] S. Mitra, S. Pal, and P. Mitra. Data mining in soft computing framework: a survey. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 13(1):3 –14, jan 2002.

[14] K. Narendra and K. Parthasarathy. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 1(1):4 –27, mar 1990.

[15] V. Oduguwa, A. Tiwari, and R. Roy. Evolutionary computing in manufacturing industry: an overview of recent applications. *Applied Soft Computing*, 5(3):281 – 299, 2005.

[16] V. Pareto. *Cours d'Économie Politique*, volume I & II. Université de Lausanne, 1897.

[17] B. Pratap, A. Agrawal, and S. Purwar. Optimal control of twin rotor mimo system using output feedback. In *Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2012 2nd International Conference on*, pages 1–6, Dec 2012.

[18] I. J. Rudas and J. Fodor. Intelligent systems. In *Proceedings of Int. J. of Computers, Communications & Control*, volume 3, pages 132–138, 2008.

[19] K. Saridakis and A. Dentsoras. Soft computing in engineering design a review. *Advanced Engineering Informatics*, 22(2):202 – 221, 2008.

[20] E. b. Scholte and M. Campbell. Robust nonlinear model predictive control with partial state information. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(4):636–651, 2008.

[21] L. L. Simon, Z. K. Nagy, and K. Hungerbuhler. Model based control of a liquid swelling constrained batch reactor subject to recipe uncertainties. *Chemical Engineering Journal*, 153(1-3):151 – 158, 2009.

[22] N. Todorovic and P. Klan. State of the art in nonlinear dynamical system identification using artificial neural networks. In *Neural Network Applications in Electrical Engineering, 2006. NEUREL 2006. 8th Seminar on*, pages 103 –108, 2006.

[23] J. Valera, E. Irigoyen, V. Gómez, F. Artaza, and M. Larrea. Intelligent multi-objective nonlinear model predictive control (imo-nmpc): Towards the ón-lineóptimization of highly complex control problems. *Expert Systems with Applications*, 39(7):6527 – 6540, 2012.

[24] L. A. Zadeh. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Commun. ACM*, 37(3):77–84, Mar. 1994.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MODELADO DE MOTORES USM PARA ROBÓTICA DE REHABILITACIÓN

Dorin-Sabin Copaci, Antonio Flores-Caballero
Fernando Martin Monar, Dolores Blanco

Avda. de la Universidad, 30 Leganés (Madrid)
dcopaci@ing.uc3m.es, afcaball@ing.uc3m.es, fmmonar@ing.uc3m.es, dblanco@ing.uc3m.es

Resumen

Este artículo muestra los resultados preliminares en el modelado y control de motores de ultrasonido. Estos actuadores, considerados tecnologías de actuación emergentes, presentan ventajas sobre los actuadores convencionales que les convierten en buenos candidatos para la actuación de sistemas robóticos de rehabilitación. Sin embargo, algunas de sus limitaciones de funcionamiento han desaconsejado su uso hasta el momento. Este trabajo intenta superar mediante un adecuado control esas limitaciones para permitir la aplicación de los motores de ultrasonido en robots de rehabilitación y exoesqueletos. El primer paso es el adecuado modelado de un sistema con un comportamiento altamente no lineal, que permita un posterior desarrollo de algoritmos de control que amplíen el rango de controlabilidad de estos actuadores, fundamentalmente a bajas velocidades.

Palabras clave: Motores de ultrasonido, modelado, control no lineal

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas decadas los motores de ultrasonido (USM) piezoeléctricos se han convertido en una alternativa a los motores electromagnéticos convencionales, especialmente para aplicaciones de posicionamiento preciso. El objetivo del trabajo que se presenta es la mejora en el modelado y control de los motores USM para permitir su incorporación en sistemas robóticos, fundamentalmente en los dedicados a la robótica de rehabilitación.

Un motor USM es un actuador cuyo funcionamiento se basa en una fuente de potencia de alta frecuencia que alimenta un elemento vibrante realizado en material de cerámica piezoeléctrica. Este tipo de motores se caracteriza en especial por la relación par-velocidad dentro de unas dimensiones muy compactas ofreciendo una potencia significativa. Entre las ventajas más destacadas se debe citar que son muy silenciosos. Los seres humanos son capaces de detectar sonidos entre 50Hz hasta 20 kHz, los motores USM funcionan con frecuencias por encima de 20 KHz. Estas dos carácterísticas, actuación silenciosa y excelente relación par-peso, hacen de los motores de ultrasonido buenos candidatos como actuadores en robótica de servicios donde la interacción del robot con los seres humanos es más estrecha y por tanto, los requerimientos de bajo peso y confortabilidad, incluyendo en ella la actuación silenciosa, son especialmente importantes. Un campo de aplicación de gran interés es la robótica de rehabilitación.

Los motores ultrasónicos, en los últimos años, han representado mucho interés para los investigadores y empezaron a ser utilizados en varias áreas de trabajo como: robótica, medicina, varios dispositivos de posicionamiento, espacio, etc.; gracias a sus características. En la robótica de rehabilitación un ejemplo de uso de los motores USM puede verse en el proyecto MANUS [6] financiado por la Unión Europea en el marco de su programa Telematics y desarrollado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España.

De forma general se pueden citar como las principales ventajas de este tipo de actuadores:

- Funcionamiento silencioso
- Excelente control en posicionamiento fino.
- Estructura muy simple.
- Par elevado para velocidades reducidas.
- No le afectan los campos magnéticos

Por contra presentan ciertos inconvenientes que han limitado su uso:

- Corto tiempo de vida.
- Caída de la relación par-velocidad.
- Pequeñas oscilaciones de velocidad alrededor de un valor medio.
- Necesita un suministrador de potencia de alta frecuencia.

Estas características hacen los motores USM ideales para aplicaciones relacionadas con la robótica,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

protésica, industria de automóvil, industria aeroespacial y otros, siempre que seamos capaces de solventar sus inconvenientes.

2. MODELADO

Para solventar los inconvenientes del comportamiento de los motores USM se requeriré del diseño de algoritmos de control especóficos que intenten mejorar su desempeño. El primer paso para desarrollar estos algoritmos de control es disponer de un buen modelo del sistema que nos permita simular de forma fidedigna su comportamiento.

En primer lugar hay que tener en cuenta que el comportamiento de los motores USM es altamente no lineal por lo que es necesario recurrir a técnicas de identificación de sistemas no lineales. Debido a la complejidad del modelo matemático de este tipo de motores, la mayor parte de los controladores se han realizado basándose en la adquisición de datos entrada/salida, en la mayoría de los casos con un modelo caja negra.

En función del comportamiento del sistema y la simplicidad del método, en el trabajo que aquí presentamos se ha optado por un modelo no lineal paramétrico de tipo caja negra tipo Hammerstein-Wiener. Este modelo está basado en una combinación entre un sistema lineal y sistemas no-lineales con una relación transparente entre ellos, que lo hace más fácil de implementar que otros métodos no lineales como las neuronales o las series Volterra.

Los modelos Hammerstein-Wiener se han usado en identificación de modelos de sistemas electromecánicos y componentes de radio frecuencia, procesamiento de audio y voz y control predictivo de procesos químicos. son populares a causa de su representación en forma de bloques, su relación transparente con los sistemas lineales y la facilidad para implementarlos en comparación con otros modelos no lineales (como las redes neuronales o los modelos Volterra)

Para la fase de identificación del modelo se ha usado la toolbox de Matlab "System Identication". Esta potente herramienta da la posibilidad de chequear varios modelos de forma rápida y sencilla.

La estructura básica del proceso de identificación se puede ver en la figura 1.

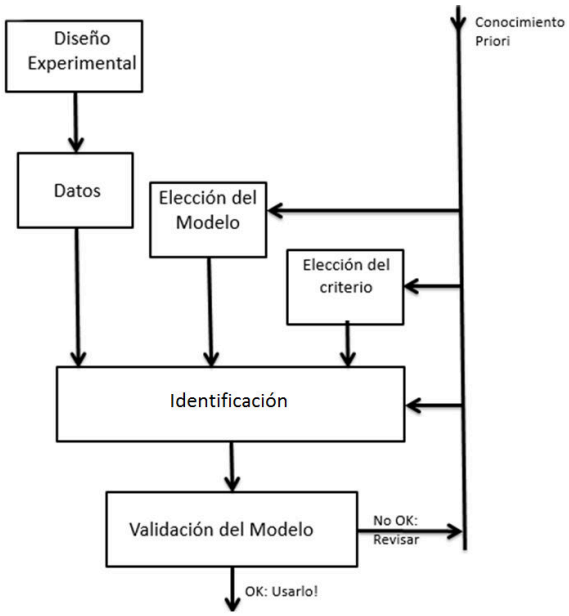


Figura 1: Estructura básica del proceso de identificación [5]

2.1. Modelo no lineal Hammerstein - Wiener

La estructura del modelo Hammerstein-Wiener que puede verse en la figura 2, está compuesta por dos bloques no lineales y un bloque lineal, donde:

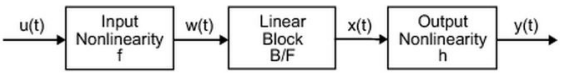


Figura 2: Estructura del modelo de Hammerstein-Wiener[4]

- En el primer bloque se calcula la función $\omega(t) = f(u(t))$ a partir de los datos de entrada. Es una función de transformación no lineal sobre los datos de entrada *u(t)*. *w(t)* tiene la misma dimension que *u(t)*. Representa una no linealidad de entrada, una función estática donde el valor de $\omega(t)$ en el instante t depende del valor de entrada en ese instante. En la toolbox de Matlab, esta no linealidad de entrada puede configurarse como una saturación, zona muerta, sigmoide, wavelet network, una función lineal por tramos, polinomio o redes neuronales personalizadas.

- $x(t) = (B/F)w(t)$ es una función de transferencia lineal. $x(t)$ tiene la misma dimensión que $y(t)$. En este caso la función de transferencia B/F puede configurarse especificando los órdenes de numerador y denominador.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- $y(t) = h(x(t))$ es una función no lineal que mapea la salida del bloque no lineal a la salida del sistema. De forma análoga a la no linealidad de entrada, la no linealidad de salida es una función estática que puede ser configurada.

Si el modelo contiene únicamente no linealidades de entrada y el bloque lineal, se denomina modelo Hammerstein. De forma análoga, cuando el modelo sólo contiene la no linealidad de salida y el bloque lineal, se denomina modelo Wiener.

3. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Para realizar la identificación de los parámetros del modelo se ha desarrollado un banco de pruebas en el que se ha seleccionado un motor USM en función de los requisitos estimados que deberán cumplirse para la movilización de un exoesqueleto de rehabilitación para la articulación del codo [2] El modelo del USM se ha obtenido en función de los datos medidos de entrada/salida donde: la señal de entrada es el voltaje (señal de control) y la salida es la velocidad del motor.

3.1. Disposición hardware del sistema de adquisición de datos

En función de los datos conocidos de la dinámica del miembro superior, el par máximo que podemos necesitar para mover el brazo de la articulación del codo es de $2{,}84Nm$ para una persona con un peso de $70Kg$ cuando no tenemos nada en la mano. También tenemos en cuenta que el usuario del dispositivo de rehabilitación tendrá un porcentaje de daño de las funciones motoras. En función de esto se ha considerado en primera aproximación, que necesitamos un actuador que nos pueda dar un par próximo a $3Nm$, para cumplir todos los casos. El motor USM seleccionado en función de estos requisitos y las características de los motores USM disponibles en el mercado es el modelo USR60-E3T de compañia Shinsei con $150rev/min$ que puede llegar hasta $1Nm$, por lo que se requiere una reductora que aumente el par y disminuya la velocidad de funcionamiento. El peso de este motor con la carcasa es de $250g$, el estator tiene unas dimensiones de $60mm$ en diámetro. Un inconveniente que presentan estos motores es el limitado tiempo de vida que es solo de 1000h de trabajo.

Los periféricos utilizados en la adquisición de datos son un encoder relativo AVAGO heds-5540 [3] con una resolución de 1024 cuentas por revolución que mide la velocidad del motor y un encoder absoluto basado en el efecto Hall con una resolución de 12 bits que mide la posición absoluta.

Tanto para el control de USM como también para la adquisición de datos se ha utilizado un microcontrolador ARM de 32 bits a 24MHz. Esta tecnología permite la programación grafica desde el programa Matlab/Simulink® gracias a un toolbox para esta arquitectura desarrollado en la Universidad Carlos III de Madrid. Esta herramienta de prototipado rápido fue utilizada con existo en varios proyectos [2], [1].

3.2. Datos de entrada

La señal de entrada para el sistema se ha elegido en función de las condiciones del método de identificación elegido y del comportamiento del USM. En función del método de identificación se requiere un señal discreta con un tiempo de muestreo de $0{,}5ms$ y una forma escalonada. El tiempo de tiempo de muestreo elegido, permite mayor precisión de la señal de salida debido a la mayor adquisición de datos en unidad de tiempo. Por otra parte en función del comportamiento del USM la señal de entrada deberá ser capaz alcanzar todos los niveles de velocidad posibles y poder identificar el fenómeno histéresis que aparece por culpa de la fricción entre el estator y rotor debido a la presión a la cual están sometidos. En función de estos requisitos la siguiente señal se ha propuesto (figura 3):

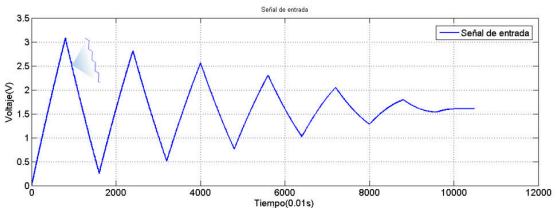


Figura 3: La señal de entrada propuesta para la identificación

La señal de entrada (el señal del control del driver entre $0 - 3{,}2V$) es capaz de alcanzar todo los rangos de velocidades proporcionados por el motor seleccionado. Esto incluye el rango de velocidad controlable especificado del fabricante entre 90 y 900 grados por segundo a un señal de control entre 0,25 y $2{,}7V$. Además, con un voltaje de $1{,}6V$ obliga el motor a mantener una velocidad constante donde se ponen en evidencia las pequeñas oscilaciones alrededor de un valor medio, que como se comentó en la introducción, son unas de las desventajas de estos actuadores.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.3. Esquema Simulink

Para la adquisición de datos conforme el hardware utilizado se han desarrollado dos programas: uno para el microcontrolador (figura 4) que se encarga de gestionar los periféricos y el driver del motor, y otro que se ejecuta desde el ordenador (figura 5) y se encarga de guardar los datos.

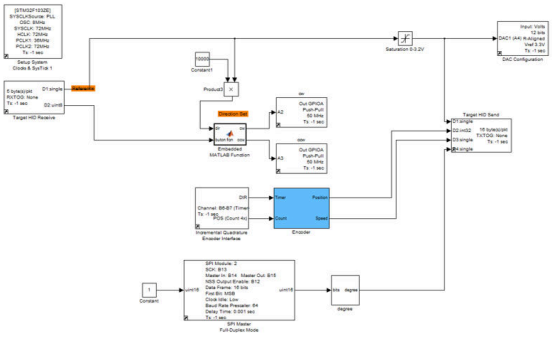
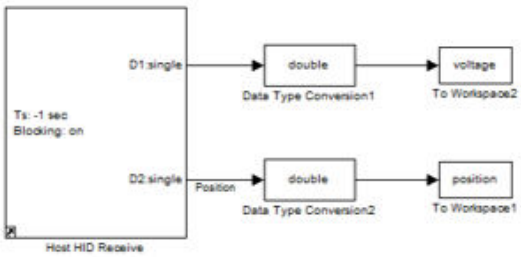


Figura 4: El programa del microcontrolador encargado con la gestión de los periféricos y señales necesarios para el driver de control



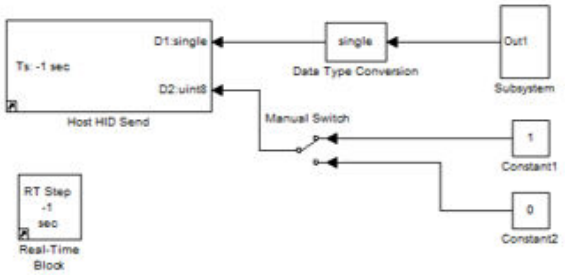


Figura 5: El programa del ordenador encargado de guardar los datos y generar el señal de entrada

El programa del microcontrolador como se puede ver en la figura 4 contiene varios bloques de Simulink® que se encargan de configurar el microcontrolador, configurar los periféricos (el encoder absoluto por I2C y el encoder relativo), gestionar el sentido de giro del motor con dos puertos digitales y enviar y los datos de posición y velocidad y recibir la referencia a través del puerto USB®.

El programa del ordenador (figura 5) se encarga de generar la señal de entrada y guardar los datos de posición y velocidad.

3.4. Datos experimentales

En función del señal de entrada, sección 3.2, la señal de salida (velocidad del motor) es el siguiente figura 6. En este caso para una mejora identificación el señal de salida ha sido preprocesado y filtrado con un filtro paso bajo. Con el preprocesamiento y el filtro paso bajo se han eliminado las tendencias y las medias de la señal como también se ha disminuido el ruido de la medida del encoder.

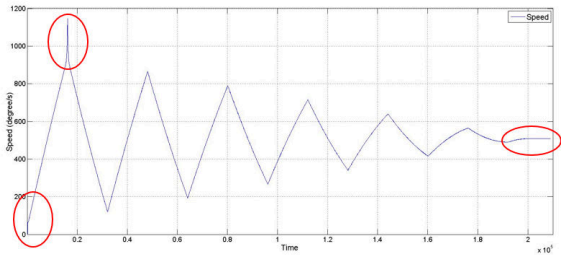


Figura 6: Señal de salida filtrado utilizado en la identificación del modelo USM (velocidad del USM)

Como se puede observar en figura 6 el comportamiento del USM en el intervalo de velocidad $0-90$ grados/segundo y en el intervalo $900-1200$ grados/segundo es distinto en comparación con el comportamiento en el intervalo $90-900$ grados/segundo. En función de esto para una mejor identificación fue propuesta la identificación del modelo del motor por regiones, obteniendo un modelo para cada intervalo. La elección del modelo adecuado se va hacer dependiendo de la referencia recibida. Modelo final prácticamente está caracterizado de una caja negra que constituido de la concatenación de estos dichos modelos. La señales de entrada salida para la identificación de los modelos para el intervalo de velocidades $0-90$ grados/segundo e intervalo $900-1200$ grados/segundo pueden verse en la figura 7.

Para una mejor precisión del modelado del comportamiento del USM, la adquisición de datos en estos dos tramos ha sido más detallada dándole como señal de entrada pequeños escalones (figura7), subiendo y bajando la velocidad.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

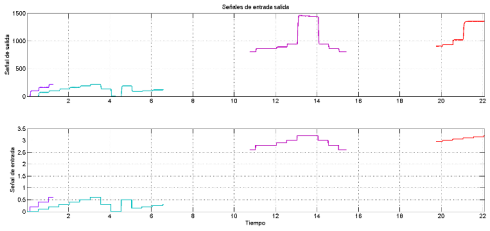


Figura 7: Señales de entrada/salida utilizados en la identificación del modelo USM por intervalos

4. RESULTADOS PRELIMINARES

El primer modelo identificado ha sido sobre el intervalo de velocidades $90 - 900$ grados/segundo.

Basándonos en la estructura de señales de entrada/salida obtenidas en el apartado 3.2 y el aparatdo 3.4, los bloques no lineales y lineales de modelo Hammerstein Wiener han sido configurados. El primer bloque que representa el estimador no lineal está basado en un modelo wavenet con 28 unidades. El bloque lineal utilizado en la identificacion del modelo de USM en método de Hammerstein Wiener es una función de transferencia de orden tres. Por lo último el estimador de no linealidades de salida del modelo está caracterizado de un modelo pwlinear con 10 unidades. La elección de esta configuración se ha realizado en función del tipo de señal de entrada salida y las no linealidades presentadas del USM donde lo importante es un conocimiento a priori y el bucle de prueba error hasta encontrar el modelo adecuado.

La comparación entre los datos de salida reales , velocidad del USM, y los estimados por el modelo, es decir, la velocidad de salida estimada del modelo Hammerstein-Wiener pueden verse en la figura 8. La precisión del modelo obtenido es del $91,78\,\%$.

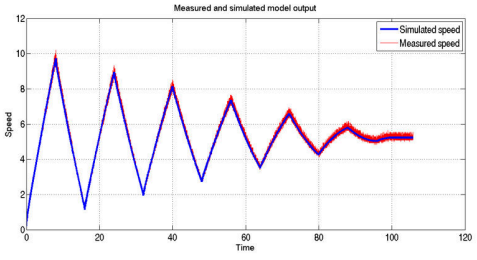


Figura 8: Señales de entrada/salida sin filtrar obtenidos despues de la identificación del modelo USM.

Como se puede observar el señal estimado (en figura 8, de color azul) se acerca bastante al señal medida, el señal real del USM (color rojo). Además, el modelo identificado sigue con bastante precisión las pequeñas oscilaciones, alrededor de un valor medio, del USM dando la posibilidad de desarrollar, implementar y probar sobre el los algoritmos de control con el objetivo de disminuir sus inconvenientes.

Los otros dos intervalos de $0-90$ grados/segundo y $900-1200$ grados por segundo están en desarrollo.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se han puesto en evidencia tanto los problemas que intervienen en el modelado de los USM como también una primera solución para la identificación del modelo del motor que es capaz de caracterizar el rango completo de velocidades de este actuador.

Un primer modelo no lineal basado en el método Hammerstein-Wiener ha sido identificado a partir de los datos de entrada (elegidos en función del comportamiento del motor y de las condiciones del método de identificación) y de los datos de salida. Se han presentado los resultados que ponen en evidencia la capacidades del método elegido.

El método propuesto de identificación por intervalos ofrece una mejor caracterización del USM incluyendo el rango de velocidades consideradas incontrolables. Un primera aproximación para el intervalo $90 - 900$ grados/segundo tiene una precisión de $91,78\,\%$.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad gracias al proyecto HYPER del programa CONSOLIDER-INGENIO2010; y por la Comunidad de Madrid a través del programa RoboCity2030-II-CM.

Referencias

[1] A.F. Caballero, D. Copaci, M. D. Blanco, L. Moreno, J. Herrán, I. Fernández, E. Ochoteco, G. Cabañero, H. Grande Innovative Pressure Sensor Platform and Its Integration with an End-User Application, Sensors,10273-10291

[2] D.S. Copaci; A.F. Caballero; A.M. Clemente; D.B. Rojas; L.M. Lorente. Ultrasonic Motor Based Actuator for Elbow Joint Functional Compensation ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, 181-194

[3] http://www.avagotech.com/docs/AV02-1046EN - Online (Julio 2014)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[4] http://www.mathworks.es/es/help/ident/ug/-identifying-hammerstein-wiener-models.html#bq4noaq - Online (Julio 2014)

[5] Ljung L., System Identification Theory for User

[6] R. Ceres; J.L. Pons; L. Calderón; J.C. Moreno; La Robótica en la Discapacidad. Desarrollo de la Prótesis Diestra de Extremidad Inferior MANUS-HAND, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 5 (2), pp. 60-68, 2008

[7] Sashida, T.; Kenjo, T.; An Introduccion to Ultrasonic Motors, Ed. Claredon Press, 1993; pp. 17-23.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SEMANTIC ENVIRONMENT FORMALIZATION FOR MOBILE ROBOTS NAVIGATION

Eduardo Munera, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose-Luis Poza-Luján, Jose E. Simó, J. Francisco Blanes
Institute of Control Systems and Industrial Computing, Polytechnic University of Valencia.
Building 8G - Access D - Polytechnic City of Innovation, Valencia, Spain
emunera@ai2.upv.es, {jposadas; jopolu; jsimo; pblanes}@disca.upv.es

Abstract

In this work is presented an environment formalization for the generic description of mobile robot environments, by offering a common semantic frame to suit almost every possible scenery. It is also designed to be used by heterogeneous groups of robots with different capabilities in terms of perception or mobility between others. In order to achieve this goal is defined a hierarchy of environment elements, that ranges from the more simple objects till the whole map specification. Furthermore, it must be able to manage 2D, 2.5D and 3D geometric representation, to deal with both, static and dynamic elements, and to describe navigation landmarks. The application of areas of interest, defined as a subsection of the full map, will optimize the environment management costs enhancing the system execution. Finally, this formalization is used to define an experimental environment in order to show the advantages of this proposal.

Key words: environment modelling; mobile robots; autonomous robots; robot navigation

1 INTRODUCTION

Mobile robots usually requires a high degree of interaction with the environment in order to execute certain tasks just as the sensorization, the manipulation, the navigation or even the coordination. For this reason the proper definition of the environment and its objects is critical for performing all this tasks [1].

For that reason, the present work aims to establish a generic formalization of the environment and its elements. The main objective of this formalization is to have a common representation which can be managed by any robot independently of its sensorial capabilities. The definition of the environment must also describe all the scene elements and discriminate between different type of objects, that may be managed as obstacles, as interaction objects, or as navigation landmarks. In addition, objects must also be defined as static or dynamic element in the scenery.

The main advantage of this formalization is the capability of developing robot applications without the need of redefining the description of the environment in order to satisfy new requirements. According to this, there are established the following objectives:

- To formalize a generic definition of the scenery, the environment objects and the landmarks, giving special relevance to the semantic information.
- To enhance the system by adding optimization mechanisms that narrows the computational costs when dealing with large map descriptions.

This article is organized as follows: in Section 2 main environment modelling and characterization techniques are discussed. Along Section 3 a formalized and generic definition for the scenery and environmental elements is established. In Section 4 the formalized proposal is carefully analyzed and verified through an example scene and several tests. Finally in Section 5 conclusions are presented, and the future work is detailed in Section 6.

2 ENVIRONMENT MODEL

In order to allow mobile robots to perform autonomously, a minimum knowledge of the environment is required [9]. That way, since early autonomous developments in the 80s [2], the representation of the robot surrounding has been continuously evolving. In firsts works environments are modelled by using occupancy grids [3], and progressively has been upgraded to more complex representation of the scene and its objects by using 3D models [11] [12].

Many 3D environment models are defined by describing its elements as a set of geometric cuboids of different characteristics. That is the case introduced in [15] which employs a representation based in Octrees [14], or the one presented in [6], that proposes a Rtrees [4] topology formed by using a set of rectangular cuboids. In both cases

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

objects can be modelled by using different levels of resolutions, allowing to represent objects from a rough surrounded geometry, till an almost exact model. Thus, environment can be specified in many different levels fitting the robot capabilities and requirements.

Despite of the quality obtained by using a 3D representation, the associated computational cost could be excessive for some applications which do not require this level of accuracy, being more efficient to use a 2D or a 2.5D representation [8]. In order to improve the flexibility of the system some proposals provide a mixed representation of 2D, 2.5D, and 3D models [7].

Nevertheless, geometric information is not the only way to characterize the environment and its elements. Humans recognize its surrounding in terms of semantics, where characteristics like the object meaning, or the interaction capabilities are evaluated rather than its numeric parameters. The use of semantic descriptions is also an extended tool in autonomous robots. Sensor classification mechanisms allows to extract semantic information from raw data [13]. In order to perform object recognition classified data can be matched with the elements definitions, that usually are compiled in data structures like tables [16]. As a result, a more human like procedure is obtained, offering a natural specification of the robot surrounding.

As has been introduced, map modelling techniques are an active topic that have been approached in a wide range of works. Although the number of researches, can not be found any solution which fits all the requirements for reaching an autonomous performance in every possible scenery. For that reason, some of this techniques will be combined, taking profit of their advantages, in order to provide a generic solution, that could fit any situation independently of the characteristics of the robot and the environment, by ensuring that in each case some minimum requirements are gathered.

3 ENVIRONMENT FORMALIZATION METHOD

Here is described the purposed formalization method for environment characterization, ranging from the the most simple element to the most complex one. It has been also introduced an hierarchy between this elements, in order to structure the different levels of the information.

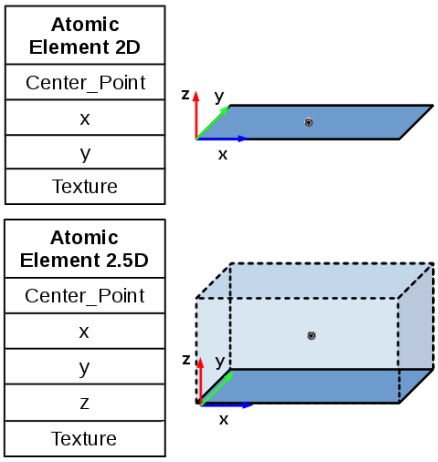


Figure 1: Atomic Element.

3.1 ATOMIC ELEMENTS

Atomic elements are the simplest structure in the environment, offering basic geometric and texture definition. In this case, atomic elements aims not to define a whole object, but bounding a basic feature of the scene. Geometric information is defined as a 2D rectangular section, such as the Rtrees [4]. This 2D representation can be extended to represent a 2.5D cuboid on those cases when features belongs to 3D objects. In both cases atomic elements offers information about its texture, which can be also defined as a plain color. As can be observed on Fig. 1 atomic elements are defined by its center point, expressed in the global space coordinates, its dimensions in x, y and z (in case of 2.5D), and its texture.

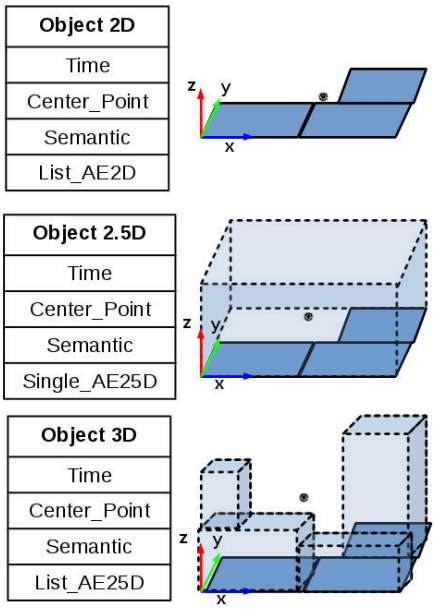


Figure 2: Environment Object.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.2 ENVIRONMENT OBJECTS

Object definition and management is one of the most important factors in order to provide a detailed and complete information of the environment. This is even more critical for autonomous robots which in most cases have to interact with its surroundings.

As is described on Fig. 2 object definition is designed to work with all 2D, 2.5D and 3D object representations. Each type is defined by the set of atomic elements that compose the object. 2D objects can be set by a single 2D atomic element or a combination of several ones. 2.5D objects can only be defined by a single 2.5 atomic element, which bounds the whole real object. Finally, 3D objects are composed by one or several 2.5D atomic elements.

The definition of any type of object includes a Semantic Tag, that refers to an entry in the semantic meanings table. In this table is gathered all the information about the semantic of every object in a more human like way. By using the semantic tag can be extracted all the object properties, such as the localization information, the dynamic, its possible interaction capabilities, etc. The information compiled into the semantic table will also depend on the characteristics of the described scenario.

The last parameter is the time stamp, that offers temporal information about the related object. This is especially critical for the management of dynamic objects which can modify its position as time advances. But time stamp can also be used in many other purposes, like information sharing, or detecting inconsistencies in the navigation system.

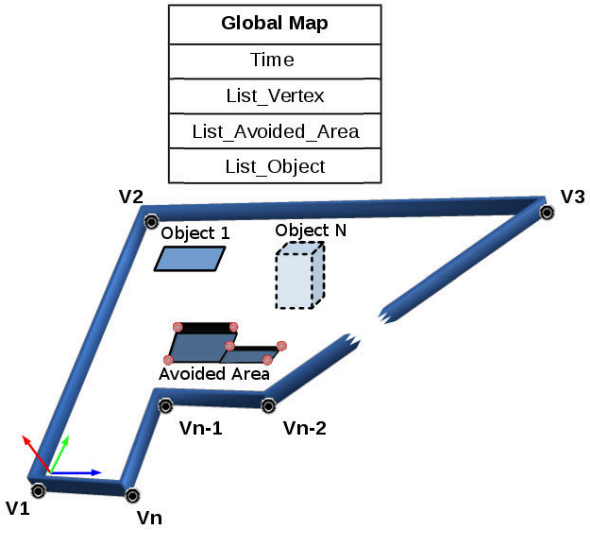


Figure 3: Global Map.

3.3 GLOBAL MAP

Global Map representation is the highest layer in the hierarchy of the environment definition, and consequently is strictly dependent of the characteristics of both, the atomic elements, and the environment objects. New information added into the environment topology is related with the geometric characteristics of the map. It is also defines the avoided map areas, as those regions bounded in the map that can not be physically accessed, such as columns, walls, etc. That way, global map definition describes the geometric bounds of the scene, in addition to the avoided areas enclosed in the whole scene. Both of them, map bounds and avoided areas, are characterized by a list of vertex which are sequentially connected between them. This specification frames the environment in its most simple way, and also encourages the application of point-in-polygon [5] algorithms, in order to found elements located inside of any avoided area, or out of the map bounds.

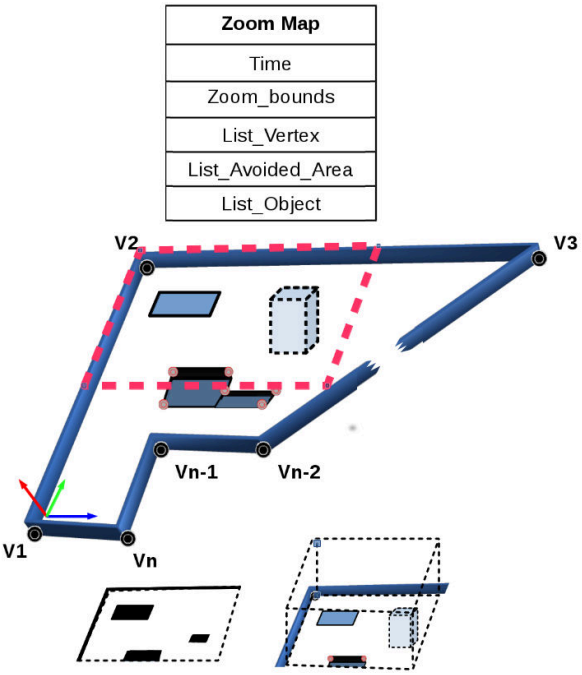


Figure 4: Zoom Map.

As is show on Fig. 3 global map is defined by a time stamp, a list of vertex, that bounds the map area, a list of avoided areas (that are characterized by their own list of vertex), and finally a list of objects enclosed in the scene. The objects in the list can be stored by using either its 2D, 2.5D, or 3D representation, according to the requirements. That way simple 2D objects can be represented without forbid a complex 3D representation of any other object. By allowing the coexistence of different types of representation, and the adaptation

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

to the simplest functional geometry in each case, the efficiency of the system is improved.

3.4 ZOOM MAP: AREA OF INTEREST

Although the definition of the global map offers a simple representation of the environment, complexity grows as the size of the scene and the number of the objects are increased. For that reason is proposed the implementation of a new structure which only manages the information framed into a region of interest, defined as a subsection of the global map. That way, cost are narrowed by reducing the number of managed elements. Furthermore, a constant size of the area of interest allows to know the worst case execution time. This size can be specified according to many different parameters such as the range of the available sensors, or the characteristics of the environment. Nevertheless, the development of a dynamic size area of interest will be considered in the future work.

In the proposed formalization, the region of interest is defined by the Zoom Map structure, which is detailed in Fig 4. Zoom Map can be specified either in 2D or in 2.5D. On one way, a 2D area of interest is focused only on a 2D projection of all the objects into the ground level, giving basic information for an optimum performance of those tasks which only requires to avoid obstacles. On the other way, 2.5D deals with all the objects (in 2D, 2.5D or 3D) enclosed into the bounding box defined as the area of interest. The Zoom Map have to update the location of the area of interest in two different situations. The first one takes place when the robot has reached a threshold distance from the center of the area. The second one is triggered by a time out that indicates the need to update the area. In both cases the conditions can be parameterized according with factors like the dynamic of the robot, the dynamic of the environment, etc.

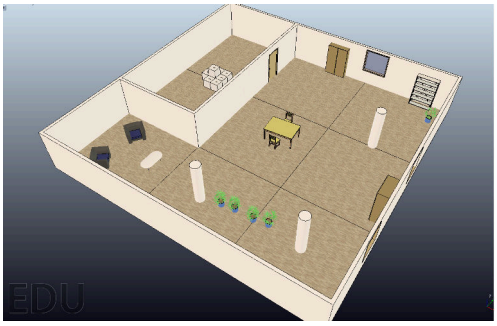


Figure 5: Environment example.

4 USE CASE AND RESULTS

In order to verify this proposal, a typical scenario is formalized using all the previously defined structures. This scenario is modelled in the V-Rep simulator [10] in order to represent a real world environment, just as can be observed in Fig. 5.

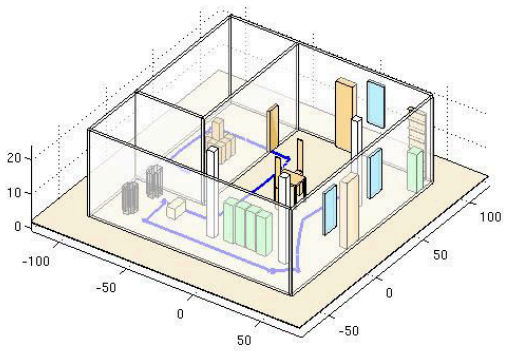


Figure 6: Graphic representation of the formalized environment.

That way, geometrical and semantic characteristic of the environment and its objects are formalized and compiled in a description file. In this definition, objects are represented in 2.5D, for the most simple geometries such as the boxes, the small table or the cupboards, or in 3D, for more complex geometries like the chairs, the shelves or the big table. Because of not being physically accessible, and due to its lack of semantic meaning, all the columns and walls have been formalized as avoided areas. The Zoom Map size and its actualization triggers are also parameterized. The graphical representation of the formalized environment can be checked in Fig. 6.

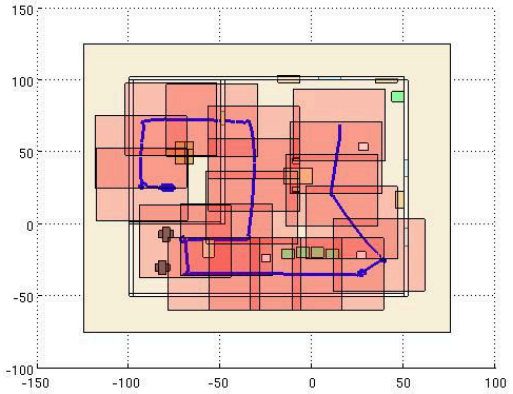


Figure 7: Evolution of zoom map areas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

In order to test the advantages of managing the Zoom Map instead of the whole map is performed the following experiment. A small wheeled robot is configured to follow a predefined trajectory all around the scenery, which can be identified as the blue line showed in Fig. 6. During this trajectory the area of interest will be updated according to its progression. Due of the dimensions of the map (15mx15m) the size of the region of interest is set to 5mx5m which represents approximately the 10 % of the whole area. Furthermore the actualization process will be triggered each time that the robot reaches a position located 3m (a 40 % of the zoom size) away from the center of the area, and generating a new area centered in the current position. According to this parameterization,the evolution of the zoomed areas can be checked in Fig. 7.

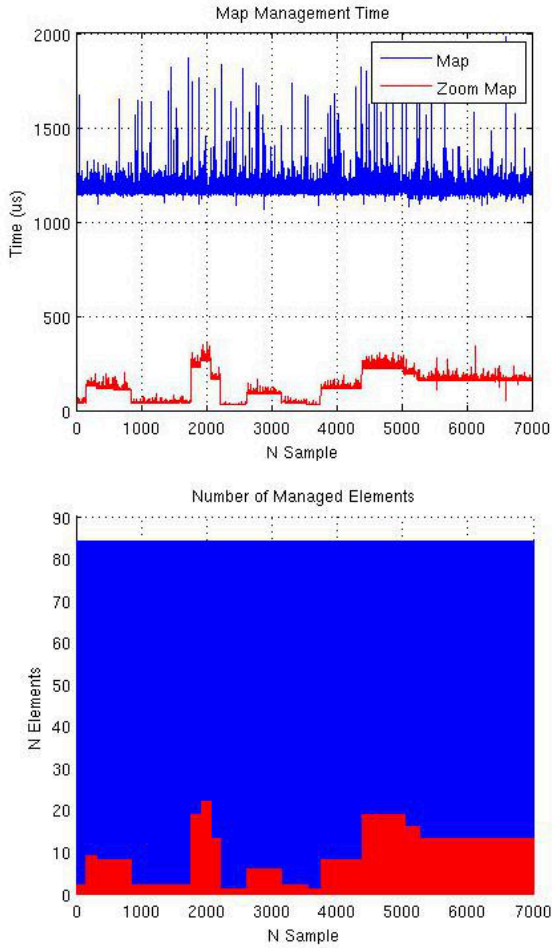


Figure 8: Management time for map and zoom map during the proposed test.

In order to quantify the improvements, during this test have been stored the temporal costs of dealing with the full specification of the Map, and the costs of managing only the Zoom Map. In this second case it also have been included all the costs related with the check of the actualization triggers, and the actualization itself. Obtained times are compared in the first graphic of Fig.8. As can be observed, in comparison when using the Zoom Map is obtained a 75 % time reduction in the worst case, and up to 90 % in the best one. Focusing on the evolution of the Zoom Map costs, updates in the area of interest can be easily noticed as square shaped regions which represents each new zoom in the map. In the case of the full Map, the computed time is always constant due of the lack of variations in the number of elements managed. The number of managed elements can be checked in the second graphic of Fig.8.

5 CONCLUSIONS

As conclusion can be highlighted the description of a formalization process which offers the capability of describe and characterize any possible environment. This provides a common representation which promotes the interaction between the robot and its surrounding. This interaction gives a strong importance to semantic meaning by adding a semantic, offering a more human friendly frame. Furthermore, system allows to discriminate different types of objects, like landmarks or dynamic elements, and manage them.

It is also introduced the Zoom Map, implemented as an interest area which provides significant improvements by selecting a subsection of the scenery according to the requirements of the performed tasks. The parameterization and update of the area of interest is a decisive factor for avoiding system malfunction and suiting the robot dynamic.

Both objectives, the generalized formalization method and the computational improvement, has been tested and verified in the result section. It has been showed a real application on a small wheeled robot, which has been configured to manage the formalized representation of a real world environment, and also to compare the time consumption when managing the whole map and the areas of interest using the Zoom Map structure.

6 FUTURE WORK

The introduced development opens several lines for future work. Some of them are focused on the improvements of the contribution itself, some others will be focused on taking profit of the optimizations mechanisms here described.

The formalization of the environment will be used as the source information for the implementation

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

of generic localization methods. The generality in this method is reached by dealing with the formalized definition of the elements, which is used by the robot for performing a match between the given map definition and the perceived surrounding. For this goal it is also necessary to perform a previous classification of the sensors raw data to extract the semantic and geometric properties of the spotted elements in the scene. That way, future work will also analyze a proper semantic classification that suits the proposed formalization by offering a generic description of the sensor measures.

The application of the Zoomed Map has promoted a significant compute save, in spite of this improvement new mechanisms must be proposed in order to exploit the optimization capabilities enabled by the Zoom Map. For that reason, a deep study of the parameterization of the area of interest is needed. One of the more decisive factors is the proper selection of the size of this area. The different variables that may be involved in the establishment of this size must be analyzed, including the dynamic of the environment, the speed of the robot, or the goal mission, between others. Furthermore, these variables will be also used for the implementation of a dynamic size Zoom Map, in which the area of interest will be escalated according to the requirements of the active task.

Acknowledgment

This work has been supported by the Spanish Science and Innovation Ministry MICINN under the CICYT project COBAMI: DPI2011-28507-C02-01/02. The responsibility for the content remains with the authors.

References

[1] Raja Chatila and Jean-Paul Laumond. Position referencing and consistent world modeling for mobile robots. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 138–145. IEEE, 1985.

[2] James L Crowley. Navigation for an intelligent mobile robot. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1(1):31–41, 1985.

[3] A Elfes. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer*, 22(6):46–57, 1989.

[4] A Guttman. *R-trees: A dynamic index structure for spatial searching*. ACM, 1984.

[5] Eric Haines. Point in polygon strategies. *Graphics gems IV*, 994:24–26, 1994.

[6] S Khan, A Dometios, and C Verginis. RMAP: a rectangular cuboid approximation framework for 3D environment mapping. *Autonomous Robots*, pages 1–17, 2014.

[7] B Lau, C Sprunk, and W Burgard. Incremental updates of configuration space representations for non-circular mobile robots with 2D, 2.5 D, or 3D obstacle models. In *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pages 49–54, Orebro, Sweden, 2011.

[8] RC Luo and CC Lai. Enriched indoor map construction based on multisensor fusion approach for intelligent service robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(8):3135–3145, 2012.

[9] Ren C Luo, M-H Lin, and Ralph S Scherp. Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 4(4):386–396, 1988.

[10] Eric Rohmer, Surya PN Singh, and Marc Freese. V-rep: A versatile and scalable robot simulation framework. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1321–1326. IEEE, 2013.

[11] S Thrun, W Burgard, and D Fox. A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*. IEEE, 2000.

[12] A Torralba, KP Murphy, WT Freeman, and MA Rubin. Context-based vision system for place and object recognition. In *Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on*, pages 273–280. IEEE, 2003.

[13] R Vieux, J Benois-Pineau, JP Domenger, and A Braquelaire. Segmentation-based multi-class semantic object detection. *Multimedia Tools and Applications*, 60(2):305–326, 2012.

[14] J Wilhelms and A Van Gelder. Octrees for faster isosurface generation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 11(3):201–227, 1992.

[15] KM Wurm, A Hornung, M Bennewitz, C Stachniss, and W Burgard. OctoMap: A probabilistic, flexible, and compact 3D map representation for robotic systems. In *Proc. of the ICRA 2010 workshop on best practice in 3D perception and modeling for mobile manipulation*, page Vol. 2, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[16] H Zhao, Y Liu, and X Zhu. Scene understanding in a large dynamic environment through a laser-based sensing. In *Robotics and Automationand Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference*, pages 127–133. IEEE, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SEGUIMIENTO DE CAMINOS PARA FORMACIONES DE VEHÍCULOS MARINOS DE SUPERFICIE

Jesús M. de la Cruz García
jmcruz@ucm.es

José A. López Orozco
jalopez@ucm.es

Eva Besada Portas
ebesada@ucm.es

David Moreno Salinas
dmoreno@dia.uned.es

Joaquín Aranda Almansa
jaranda@dia.uned.es

Resumen

Se presenta un algoritmo para el control de formaciones y seguimiento de caminos para vehículos marinos de superficie. El algoritmo sigue una estructura maestro-esclavo, el maestro sigue una ruta establecida con un perfil de velocidad determinado, y el resto de vehículos se sitúa en la formación deseada. El algoritmo supone que los vehículos están dotados de un controlador de rumbo y utiliza una ley de guiado por línea de vista y target virtual, tanto para el maestro como para los esclavos. El algoritmo tiene la ventaja de la sencillez y sólo necesita de la sintonía de un parámetro para cada uno de los vehículos. Se muestran experimentos con modelos reales a escala que validan el método propuesto.

Palabras Clave: seguimiento de caminos, control de formaciones, vehículos marinos de superficie, control de barcos.

1 INTRODUCCIÓN

Al igual que los vehículos autónomos aéreos, los vehículos autónomos marinos de superficie (USVs) están conociendo un auge creciente en aplicaciones no sólo militares, sino también civiles, para tareas tales como estudios de batimetría, monitorización de las condiciones medioambientales de superficies marinas o de ríos y lagos, protección de costas, apoyo a vehículos sumergibles y otros. A su vez, está aumentando el uso de múltiples vehículos autónomos que actúan de forma coordinada y cooperativa para la realización de algunas de las aplicaciones, con la seguridad de que así se pueden realizar las tareas de forma más robusta y efectiva en tiempo y coste. Misiones de exploración, búsqueda y rescate en el mar son claros ejemplos de ello. En algunos casos es necesario que los vehículos se muevan manteniendo una formación. Ejemplos son el arrastre de una red, o barrera, para recogida de vertidos contaminantes, plásticos u otros productos, y el reabastecimiento de un barco por otro mientras navegan.

Se han publicado muchos artículos sobre la coordinación y cooperación de vehículos. Una revisión se puede encontrar en [2], [10], [12]. Trabajos recientes en el campo de formaciones de USVs son [1], [3], [4], [13]. A partir de ellos y sus referencias se puede conseguir una amplia visión de la evolución y estado actual del tema.

En este trabajo se trata el problema del control de formaciones de USVs. Se supone que los vehículos disponen de un sistema de control interno que les permiten seguir los rumbos generados por el sistema de guiado. De esta manera suponemos separados el sistema de guiado, o lazo de control externo, del lazo de control interno. Este modo de proceder permite diseñar algoritmos más sencillos de guiado que en el caso en que se integran los dos modos de control, interno y externo. El algoritmo propuesto se basa en el de seguimiento de caminos de [5]. Este método tiene la ventaja de que sólo se requiere un parámetro de sintonía para el seguimiento de caminos, que además tiene una clara significación física.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema que se plantea es el de diseñar un control descentralizado para un grupo de vehículos marinos de superficie, de modo que, tras un transitorio, adopten y mantengan una determinada formación geométrica. No obstante durante la escritura del artículo nos centramos en un grupo con sólo dos vehículos, sin que esto suponga ninguna perdida de generalidad, ya que el método es fácilmente extensible a más.

Se supone que un barco sirve de maestro y sigue una ruta determinada con un cierto perfil de velocidad, mientras que el otro debe seguirlo a una distancia y con una orientación determinada. Si elegimos unos ejes *m* ligados al vehículo maestro con el eje *x* en la dirección del vector velocidad, la formación, o posición relativa del vehículo esclavo, queda caracterizada por las coordenadas longitudinal y transversal $[d_s, e_s]$. La figura 1 ilustra el problema.

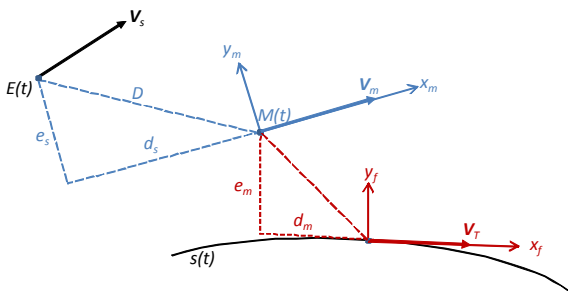


Figura 1: Dos vehículos en formación. *M* barco maestro, *E* barco esclavo.

El objetivo es que el vehículo maestro converja a la trayectoria *s(t)* y el vehículo esclavo converja a la formación especificada. Así, si $[d_m, e_m]$ son las coordenadas del maestro con respecto a unos ejes que se mueven sobre la trayectoria con el eje *x* en la dirección tangente, se debe hacer que dichas coordenadas converjan a cero,

$$\lim_{t\to\infty} d_m \to 0, \quad \lim_{t\to\infty} e_m \to 0. \tag{1}$$

Y el esclavo debe converger a una posición relativa dada $[d_s^*, e_s^*]$,

$$\lim_{t\to\infty} d_s \to d_s^*, \quad \lim_{t\to\infty} e_s \to e_s^*. \tag{2}$$

Además, el barco maestro debe seguir la trayectoria con un perfil de velocidad especificado: $U_d(t) > 0$. También se deben cumplir las siguientes restricciones en la velocidad de avance del barco esclavo,

$$U_s(t) \in [U_{\min}, U_{\max}], \quad 0 < U_{\min} < U_{\max} \tag{3}$$

donde

$$U_{\min} < U_d(t) < U_{\max} \tag{4}$$

Se supone que con una velocidad de avance inferior a $U_{\min}$ no es posible controlar al vehículo.

El problema se puede descomponer en dos tareas [13]:

1. Seguimiento del barco maestro de una ruta, conocida sólo por él, con un perfil de velocidad determinado $U_d(t)$.
2. Sincronización del barco esclavo de modo que se consigue la formación deseada.

La solución propuesta en este artículo es un control descentralizado que requiere que el controlador de cada barco tenga acceso a su propia posición, orientación y vector velocidad en ejes cuerpo. Además, el barco esclavo recibe información de la posición y velocidad del barco maestro sin restricciones en la comunicación.

3 ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE CAMINOS

3.1 Ecuaciones cinemáticas del movimiento

Consideramos que un vehículo con posición *M(t)* está descrito por el modelo de tres grados de libertad

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u_r \cos\psi_b - v_r \sin\psi_b + V_{cx} \\ \dot{y} &= u_r \sin\psi_b + u_r \cos\psi_b + V_{cy} \\ \dot{\psi}_b &= r \end{aligned} \tag{5}$$

Donde (x, y, ψ_b) son la posición y orientación del vehículo con respecto a un sistema de referencia inercial *I*, y (u_r, v_r, r) son las velocidades lineales, de avance y de deslizamiento con respecto al agua, y angular en un sistema de coordenadas ligadas al vehículo, o ejes cuerpo *b*. Suponemos que hay una corriente irrotacional de valor constante, que en el sistema inercial tiene la forma $\boldsymbol{V}_c=[V_{cx}, V_{cy}]$, por lo que la derivada temporal del vector velocidad es cero. La ecuación (5) corresponde a la suma del vector velocidad relativa del vehículo con respecto al agua $\boldsymbol{V}_r$ y el vector velocidad de la corriente. Se puede escribir de la forma

$$\begin{aligned} \dot{x} &= U \cos\psi_V \\ \dot{y} &= U \sin\psi_V \\ \dot{\psi}_V &= r \end{aligned} \tag{6}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

donde U es la velocidad absoluta del vehículo con respecto al sistema inercial y ψ_V es el rumbo del vector velocidad con respecto al sistema inercial. Un sensor inercial mide el vector $\boldsymbol{V} = \boldsymbol{V}_c + \boldsymbol{V}_r$ en ejes cuerpo.
Las señales de control para el vehículo son u_r y r. El sistema es, pues, sub-actuado.

3.2 Cinemática del camino

Suponemos definido la trayectoria o camino que debe seguir el barco maestro. Consideramos un punto virtual *P(t)*, que se mueve a lo largo del camino, y un sistema de referencia f de Serret-Frenet asociado con él. Dicho punto se denomina vehículo virtual o 'target'. La abscisa de f es tangente a la trayectoria. La orientación de la abscisa del sistema f con respecto al sistema inercial es ψ_f. La matriz de rotación que pasa del sistema inercial al sistema f es, pues,

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi_f & \sin\psi_f \\ -\sin\psi_f & \cos\psi_f \end{bmatrix} \tag{3}$$

Definimos $r_f = \dot{\psi}_f$ y denominamos mediante s a la distancia recorrida por el target a lo largo de la trayectoria. Se tiene entonces

$$r_f = \dot{\psi}_f == \kappa(s)\dot{s} \tag{7}$$

Donde $\kappa(s)$ es la curvatura con signo de la trayectoria y $\dot{s}$ la velocidad del vector tangente a la trayectoria. El vector velocidad del punto virtual expresado en f es $\boldsymbol{V}_T = \begin{bmatrix} \dot{s}, & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$.
La posición del vehículo *M(t)* se puede expresar en un plano bien como $[x, y]^{\mathrm{T}}$ en ejes inerciales, o bien como $[d, e]^{\mathrm{T}}$ en ejes f; donde d es el error longitudinal entre la posición del punto virtual y el vehículo, y e es el error transversal. La figura 2 muestra la geometría de la cinemática del vehículo y del punto virtual.
La cinemática del movimiento del vehículo expresado en el sistema de referencia f es [7]

$$\begin{aligned} \dot{d} &= -\dot{s}(1-\kappa(s)e) + U\cos\psi \\ \dot{e} &= -\kappa(s)\,\dot{s}\,d + U\sin\psi \\ \dot{\psi} &= \dot{\psi}_V - \dot{\psi}_f = \dot{\psi}_V - \kappa(s)\dot{s}. \end{aligned} \tag{8}$$

Donde U es el valor absoluto del vector $\boldsymbol{V}$, y $\psi = \psi_V - \psi_f$ es el rumbo relativo del vehículo con respecto al punto virtual.

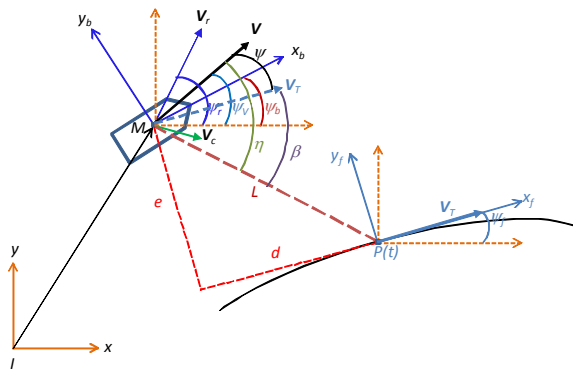


Figura 2: Geometría de la trayectoria y el vehículo maestro

3.3 Algoritmo de guiado para el vehículo maestro

El algoritmo de guiado para el vehículo maestro es el dado en [5], que combina el algoritmo de guiado de [7] y de [11]. La ley de control está dada por las relaciones

$$\dot{\psi}_V = -\frac{2U}{L}\sin\eta, \qquad |\eta| \le \frac{\pi}{2} \tag{9}$$

$$\dot{\psi}_V = -\frac{2U}{L}\mathrm{sign}(\eta), \quad |\eta| > \frac{\pi}{2} \tag{10}$$

$$\dot{s} = U\cos\psi + K(s_1 + L) \tag{11}$$

donde η es el ángulo creado por la línea que une el punto *M(t)* con *P(t)* y el vector $\boldsymbol{V}$. Representamos por β al ángulo que forma la línea que une los dos puntos anteriores con el vector $\boldsymbol{V}_T$. Se verifica entonces

$$\eta = \beta + \psi \tag{12}$$

Los tres ángulos de (12) están definidos en $[-\pi, \pi]$. El objetivo de esta ley de guiado es hacer que el vehículo tienda a la trayectoria y siga al punto virtual a una distancia dada L. La ecuación (9) proporciona una rotación angular instantánea al vehículo. La ecuación (10) da la máxima velocidad de giro dado por la ecuación (9) cuando el ángulo η es superior, en valor absoluto, a 90º. La ecuación (11) incluye el término L con el fin de que el vehículo siga al punto virtual con error longitudinal constante.

Aunque el algoritmo utiliza dos parámetros, K y L, sólo hay que sintonizar el segundo. El valor de K queda determinado en función de L, V y del radio de giro de la trayectoria. Como se muestra en [6] el valor de L se debe elegir teniendo en cuenta la dinámica del vehículo y se debe modificar en función de la velocidad V para mantener una respuesta dada a

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

pesar de variaciones en V. El análisis de las propiedades y ventajas de este algoritmo se encuentran en [5].

3.4 Algoritmo de guiado para el vehículo esclavo

Para el control del vehículo esclavo utilizamos una ley de control similar a la del maestro para seguir la trayectoria. Suponemos un punto virtual sobre la trayectoria que debería seguir el vehículo guiado en la situación estacionaria y a una distancia L por delante de él. De este modo las ecuaciones que describen la dinámica de seguimiento del punto virtual son similares a las utilizadas en el caso del vehículo maestro (8). No obstante, se hace necesario que el vehículo esclavo reconstruya la trayectoria seguida por el maestro. Consideramos dos casos: seguimiento de una trayectoria recta y seguimiento de una circunferencia.

3.4.1 Seguimiento de una trayectoria recta

Suponemos que el barco maestro sigue una trayectoria recta con el perfil de velocidad especificado $U_d(t)$. El barco esclavo E recibe del maestro la posición M y vector velocidad $\boldsymbol{V}_m$. La figura 3 ilustra la geometría de la ley de control.

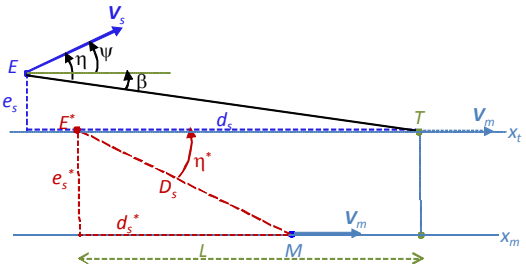


Figura 3: Geometría del seguimiento del barco maestro por el barco esclavo para el diseño del control de éste en una trayectoria recta.

Suponemos que el barco maestro sigue una trayectoria recta con vector velocidad $\boldsymbol{V}_m$ y m es un sistema de referencia ligado al barco maestro con x_m el eje x en la dirección del vector velocidad y con origen M. La posición deseada del barco esclavo para la formación es conocida y está dada por $[d_s^*, e_s^*]^T$ en ejes m. Fijar estas coordenadas es equivalente a fijar una distancia D_s y un ángulo de vista η^* deseados, del barco esclavo con respecto al barco maestro. Estas coordenadas determinan el punto E^* como posición deseada para el barco esclavo. Consideramos ahora un vehículo virtual que se mueve con velocidad igual a la del maestro $\boldsymbol{V}_m$ a una distancia L por delante de E^* en una recta paralela al eje x_m y que pasa por E^*. Su posición se designa mediante T. Suponemos, además, un sistema de referencia t paralelo a m con origen en T. La posición del barco esclavo con respecto a este sistema de referencia es $[d_s, e_s]^T$. La ley de control debe situar al barco esclavo en la posición E^*, que en ejes t implica que $[d_s=-L, e_s=0]^T$; lo que equivale a situarlo sobre el eje x_t a una distancia $d_s = -L$ (detrás del punto virtual T) siendo L un parámetro de diseño del control. La línea de vista de E a T forma un ángulo η con el vector velocidad $\boldsymbol{V}_s$, y un ángulo β con el vector $\boldsymbol{V}_m$. El vector velocidad $\boldsymbol{V}_m$ forma un ángulo ψ con el vector velocidad $\boldsymbol{V}_s$. Hemos elegido para estos ángulos una representación igual a la usada en la figura 2, ya que el papel que juegan es equivalente en ambos casos. En este caso también se verifica la ecuación (9).

De esta manera, el problema de control del vehículo esclavo es el de seguimiento de un punto virtual similar al de seguimiento de ruta para el barco maestro, pero con la diferencia de que ahora no se calcula la velocidad del punto virtual, sino que esta está dada por la velocidad del barco maestro, y es necesario calcular la velocidad del barco esclavo o seguidor del punto virtual. Pero la ley de control de rumbo es similar a (9)-(10).
Así pues, la ley de control consta de dos términos. El primero controla el rumbo del barco y se encarga de dirigir al barco de modo que tienda a la posición lateral deseada e_s^* o, de forma equivalente, que haga cero a e_s:

$$\dot{\psi}_{V_s} = -\frac{2U_s}{L}\sin\eta, \qquad |\eta| \le \frac{\pi}{2} \tag{13}$$

$$\dot{\psi}_{V_s} = -\frac{2U_s}{L}\operatorname{sign}(\eta), \quad |\eta| > \frac{\pi}{2} \tag{14}$$

donde U_s es el valor absoluto del vector velocidad $\boldsymbol{V}_s$. El segundo término trata de que la velocidad del barco esclavo siga a la velocidad del barco maestro. Para este término usamos

$$\begin{aligned} &\text{if } (d_s + L) > 0 \ \wedge \ \operatorname{sign}(\cos\psi) < 0 \text{ then} \\ &\qquad U_s = U_m + K(d_s + L) \\ &\text{else} \\ &\qquad U_s = U_m - K(d_s + L) \end{aligned} \tag{15}$$

La idea de (15) se ilustra en la figura 4. El punto rojo es el maestro y el punto azul el esclavo. Las flechas indican el sentido del movimiento de los barcos. La velocidad se debe incrementar siempre salvo en el caso 1. En los casos 2 y 4 la velocidad se incrementa para aumentar la velocidad de giro; en el caso 3 para que se acerque a la distancia L; en el caso 1 la velocidad se decrementa para acercarse a distancia L.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El valor de K se determina mediante la relación [10]

$$K = 4\frac{U_m}{L} \tag{16}$$

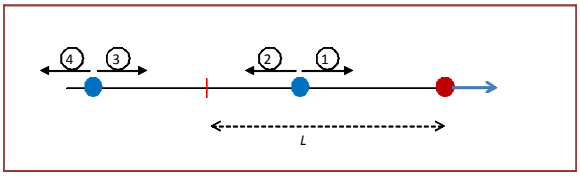


Figura 4: Distintas posibilidades de movimiento del barco esclavo (azul) con respecto al maestro (rojo).

Las leyes de control (13)-(14) y (15) aseguran la convergencia del barco esclavo a la posición deseada.

3.4.2 Seguimiento de una trayectoria circular

Suponemos ahora que el barco maestro sigue una circunferencia de radio R con el perfil de velocidad especificado $U_d(t)$. El barco esclavo E recibe del maestro la posición M, vector velocidad $\boldsymbol{V}_m$ y el radio de la circunferencia R. La ley de control del vehículo esclavo es similar al caso de la línea recta en que: el barco sigue un punto virtual determinado por la posición actual del barco maestro y la posición relativa deseada para el barco esclavo. La figura 5 ilustra la geometría de la ley de control; en ella se usa la misma notación que para una trayectoria recta. Cuando el barco M describe una circunferencia de radio R hace que el punto E^*, que define la posición deseada en la formación para el barco esclavo, describa una circunferencia de radio R^*. Sobre esta circunferencia consideramos un punto T a una distancia L de E^* donde se sitúa un vehículo virtual que se mueve en con la velocidad

$$U_t = U_m \frac{R^*}{R}. \tag{17}$$

Consideramos un sistema de referencia en el punto T con el eje x en la dirección tangente a la circunferencia y vector unitario $\boldsymbol{T}_t$. Al igual que para la trayectoria recta, la posición del barco esclavo con respecto a este sistema de referencia es $[d_s, e_s]^{\mathrm{T}}$.
El objetivo del control es que el barco esclavo tienda al punto E^*, lo que se puede conseguir haciendo que el barco esclavo siga al punto virtual en T utilizando una ley de control. Ésta, nuevamente, consta de dos términos, uno que cambia el rumbo del barco:

$$\dot{\psi}_{V_s} = -\frac{2U_t}{L}\sin\eta, \qquad |\eta| \le \frac{\pi}{2} \tag{18}$$

$$\dot{\psi}_{V_s} = -\frac{2U_t}{L}\mathrm{sign}(\eta), \quad |\eta| > \frac{\pi}{2} \tag{19}$$

y otra que modifica la velocidad de avance del barco:

$$U_s = U_t - K(d_s + L*\cos\frac{\psi_t}{2}) * \ \mathrm{sign}(\cos\psi) \tag{20}$$

Donde $-L*\cos\frac{\psi_t}{2}$ es el valor de la abscisa de E^* con respecto al sistema de referencia t. El parámetro K de (20) se calcula a partir de la relación deducida en [5] para el seguimiento de una trayectoria circular

$$\frac{K\,L}{U_t} = \frac{1-\cos(\psi_t^*)}{1-\cos(\psi_t^*/2)}. \tag{21}$$

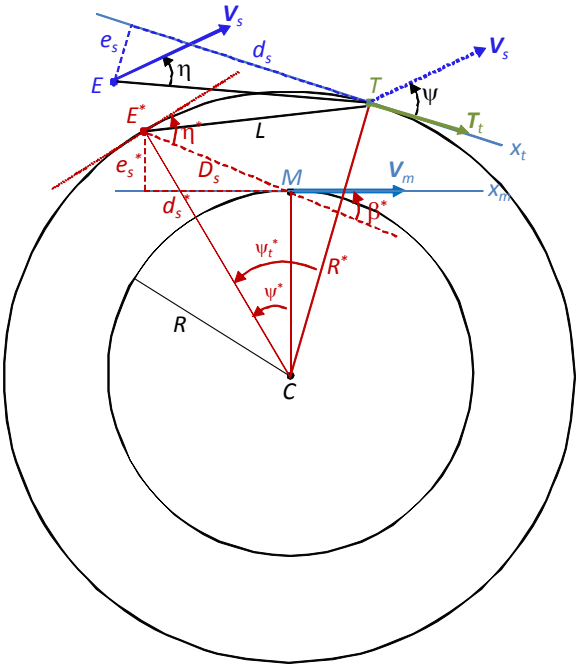


Figura 5: Geometría del seguimiento del barco maestro por el barco esclavo para el diseño del control de éste en una trayectoria circular.

4 EXPERIMENTO DE CONTROL DE FORMACIÓN

Para validar los algoritmos se han realizado experimentos con dos barcos construidos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo. Uno, que denominaremos como B1, corresponde a un modelo de 5 metros de eslora y 1 metro de manga. El modelo corresponde a un barco real con escala 1:15. La tara del modelo es de 277 Kg. La velocidad máxima es de 4 m/s. El otro, que denominaremos B2, corresponde a un modelo de 3.5 metros de eslora y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

corresponde a un barco real con escala 10.8, y velocidad máxima 4 m/s. Las experiencias se han realizado en el pantano de Valmayor en Madrid gracias a una colaboración con el Canal de Isabel II Gestión. La figura 6 muestra una imagen de ambos barcos realizando una trayectoria circular en formación.

Figura 6: Movimiento en formación de los dos barcos en una trayectoria circular.

Se dispone de dos sistemas de navegación inercial con ayuda GPS (IMU-GPS). Uno, modelo F180 de Codaoctopus, permite conocer la posición, velocidad y rumbo con las precisiones de 0.5m, 0.04 m/s y 0.1º, y otro, modelo VN-200 de Vectornav, con las precisiones de 2.5 m, 0.1 m/s y 2.0º. Ambos se pueden utilizar en cualquiera de los barcos. Cada modelo disponen para su control de un PC Industrial Beckhoff C6920, con sistema operativo TwinCAT de tiempo real. Ambos equipos se puede utilizar con cualquiera de los barcos sin más que cambiar unos parámetros de configuración. La comunicación con el centro de supervisión y control se realiza mediante sistema wifi Ubiquiti en la banda de 2.4 GHz. Los barcos disponen de antenas omnidireccionales modelo PicoStation M con 1 W de potencia. Para la recepción en la estación de tierra se utilizan antenas sectoriales modelo NanoStation M2 de 1 W. Estas antenas permiten una cobertura teórica de 5 Km.
En [8] y [9] se pueden encontrar modelos detallados del comportamiento de estos barcos. No obstante, para diseñar el control se ha utilizado un modelo de Nomoto de segundo orden tanto para la velocidad angular *r* como para la velocidad de deslizamiento *v:*

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{0.4878}{4.553s^2 + 4.27s + 1}$$

$$\frac{v}{\delta}(s) = \frac{0.1247}{4.553s^2 + 4.27s + 1}$$

donde δ representa la posición del timón en grados. El timón está limitado a valores entre ±30º y velocidad máxima de 10º/seg. El control de rumbo es de tipo PID. Los parámetros se han determinado de forma óptima para minimizar una función de coste cuadrática del error y de la señal de control. Para B1 los parámetros son: $K_p = 0.79$, K_i=0, $K_d = 2.21$, $N = 1.40$, donde N es el coeficiente del filtro de la acción derivativa.
La velocidad de avance de B1 se puede modelar de forma aproximada por un modelo de primer orden

$$\frac{U}{\tau_u}(s) = \frac{0.34}{9.89s + 1}$$

Se controla mediante un controlador PI que se determina de modo que en lazo cerrado se tenga una anchura de banda de 0.09 rad/seg y un coeficiente de amortiguamiento unidad. El periodo de muestreo es de 0.1 seg.

En todas las experiencias el barco B1 actuaba de barco esclavo y el B2 de barco maestro y las maniobras se realizaron con velocidad del barco maestro constantes.

La figura 7 muestra resultados de simulación obtenidos cuando B1 sigue a B2 en una trayectoria recta. El barco maestro sigue una línea recta con una velocidad de 2 m/seg y rumbo de 45º. Su posición inicial se toma como origen de coordenadas inerciales. El barco esclavo está situado en la posición $[-80, 0]^T$ con rumbo inicial de -120º. La formación se especifica de modo que el barco esclavo siga al maestro a una distancia de 20 m y con un ángulo de vista de +75º. Esto equivale a: $d_s^* = -5.17$ m, $e_s^* = 19.31$ m. Para la ley de guiado se ha escogido *L=50.* En la figura 7a se muestra el recorrido de cada uno de los barcos, en rojo el barco maestro y en negro el esclavo. La posición inicial de ambos se muestra mediante un círculo y una cruz del color del recorrido. Las líneas azules muestras el segmento que une la posición de ambos barcos en instantes de tiempo periódicos. Figura 7b muestra la distancia al barco maestro y las coordenadas d_s, e_s del vehículo esclavo. Las líneas discontinuas son los valores especificados. La figura 7c muestra la velocidad angular y lineal generada por el algoritmo de guiado para que el barco esclavo siga al maestro. Durante aproximadamente los primeros 60 segundos al barco esclavo se le pide la máxima velocidad de 4 m/seg, y después decae suavemente hasta la velocidad del barco maestro de 2 m/ seg. El seguimiento al cabo de unos 100 segundos es prácticamente perfecto.

La figura 8 muestra los resultados de simulación para el seguimiento en formación de una circunferencia. Como en el caso anterior, el barco maestro tiene una velocidad de 2 m/seg y se especifica la misma formación y el mismo valor de *L*. La circunferencia tiene un radio de 100 m y está centrada en el origen.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

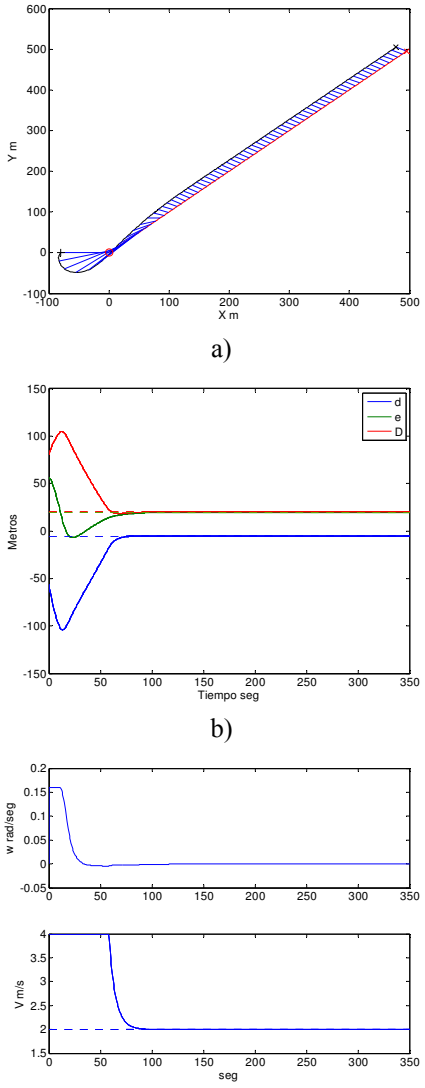


Figura 7: Formación con seguimiento de una línea recta. a) Trayectoria de los barcos maestro, en rojo, y esclavo, en negro; b) coordenadas y distancia del barco esclavo con respecto al maestro; c) velocidades angular y lineal generadas por el algoritmo de guiado.

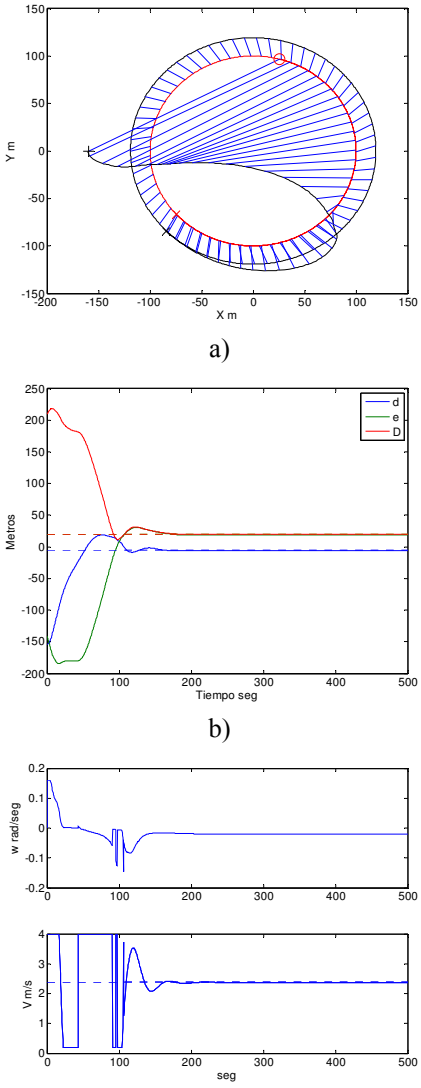


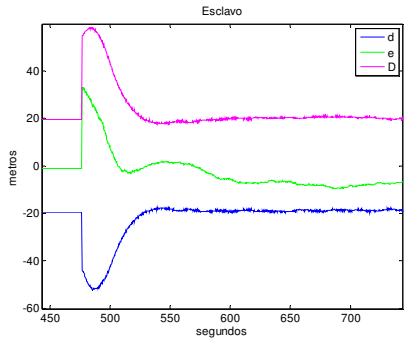
Figura 8: Formación con seguimiento de una circunferencia. a) Trayectoria de los barcos maestro, en rojo, y esclavo, en negro; b) coordenadas y distancia del barco esclavo con respecto al maestro; c) velocidades angular y lineal generadas por el algoritmo de guiado.

El giro es en el sentido de las agujas del reloj. Inicialmente el barco maestro está siguiendo la circunferencia en una posición especificada por un ángulo de 75º. La posición inicial de barco esclavo es $[-160,0]^T$ y su rumbo es de -120º. En este caso se observa en el estacionario un pequeño desplazamiento de 20 cm en la coordenada e_s y de 90 cm en la coordenada d_s. El desplazamiento en la distancia es de 4 cm.

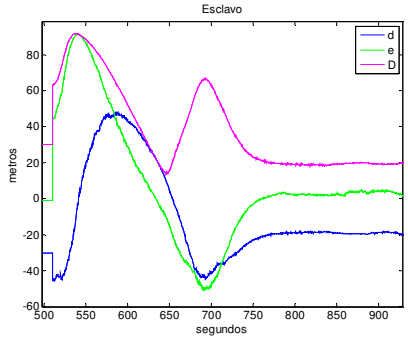
Finalmente la figura 9 muestra los resultados de experimentos realizados en Valmayor. En la figura 9a) se muestran la distancia y coordenadas del barco esclavo con respecto al maestro cuando este sigue una línea recta con una velocidad de 1 m/seg. La formación especificada es la de mantener una distancia de 20 m y un ángulo de línea de vista de -20º, lo que equivale a $d_s^* = -18.8$ m y $e_s^* = -6.8$ m. El valor de L es de 50 m.Tras el estacionario se obtiene para la distancia una media de 20.2 m con una desviación estándar σ de 0.4 m; para d_s un valor medio de -18.9 con σ de 0.3 m, y para e_s un valor medio de -7.0 m con σ de 1.6 m. En la figura 9b se muestran los resultados cuando el barco maestro sigue una circunferencia de 60 m de radio con una velocidad de 1 m/seg. La distancia especificada para el barco esclavo es de 20 m y el ángulo de vista de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

+20º. El valor de L sigue siendo de 50 m. En este caso, en el estacionario se obtiene: para la distancia una media de 20.4 m con σ de 1.5 m; para d_s un valor medio de -19.8 con σ de 0.9 m, y para e_s un valor medio de -0.9 m con σ de 4.8 m. Como vemos la distancia se mantiene bastante bien, si bien se producen variaciones en el desplazamiento lateral debido al deslizamiento de los barcos.



a)



b)

Figura 9: Resultados de experimentos con los barcos en el pantano de Valmayor. a) trayectoria recta; b) trayectoria circular.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos DPI2009-14552-C2 y DPI2013-46665-C2. Queremos agradecer el trabajo del técnico David Sánchez Foces sin cuya colaboración no se hubieran podido realizar las experiencias.

Referencias

[1] Almeida, J., C. Silvestre and A. M. Pascoal, "Cooperative control of multiple surface vessels with discrete-time periodic communications," Int. J. Robust. Nonlinear Control, vol. 22, pp.398–419, 2012.

[2] Bai, H., M. Arcak, and J. Wen, *Cooperative Control Design*. Communications and Control Engineering, Springer, 2011.

[3] Bibuli, M., M. Caccia, L. Lapierre & G. Bruzzone, "Guidance of Unmanned Surface Vehicles. Experiments in Vehicle Following", IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 19, n. 3, pp. 92-102, 2012.

[4] E. Børhaug, A. Pavlov, E. Panteley, and K. Y. Pettersen, "Straight line path following for formations of underactuated marine surface vessels," Control Sys. Tech., IEEE Trans. on, vol. 19, no. 3, pp. 493-506, 2011.

[5] Cruz, J. M de la, E. Besada-Portas, J. A. López-Orozco and J. Aranda-Almansa, "A Nonlinear Path Following Kinematic Controller". To be published.

[6] Curry, R., M. Lizarraga, B. Mairs, and G. Elkaim, "L+2 , An Improved Line of Sight Guidance Law for UAVs," in American Control Conference, ACC, Washington, D.C., pp. 1-6, June 2013.

[7] Lapierre, L., Soetanto, D., A. Nonlinear path-following control of an AUV", Ocean Engineering, Vol. 34, 2007, pp. 1734–1744.

[8] Moreno-Salinas, D., D. Chaos, J. M. de la Cruz, J. Aranda. Identification of a surface marine vessel using LS-SVM. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2013, Article ID 803548, pp. 1-11.

[9] Moreno-Salinas, D., D. Chaos, E. Besada-Portas, J.A. López-Orozco, J. M. de la Cruz and J. Aranda. Semiphysical Modelling of the Nonlinear Dynamics of a Surface Craft with LS-SVM. Mathematical Problems in Engineering, Volume 2013, Article ID 890120.

[10] Murray, "Recent research in cooperative control of multivehicle systems." Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol 129, n 5, pp. 571–583, 2007.

[11] Park, S., Deyst, J., and How, J.P., "Performance and Lyapunov Stability of a Nonlinear Path-Following Guidance Method," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, n. 6, Nov.–Dec. 2007, pp. 1718–1728.

[12] K. Pettersen, J. Gravdahl, and H. Nijmeijer, eds., *Group Coordination and Cooperative Control*. Springer, 2006.

[13] E. Peymani and T.I. Fossen, "Leader-Follower Formation of Marine Craft using Constraint Forces and Lagrange Multipliers," in Proc. 51st IEEE Conf. on Decision Control, Maui, HW, pp. 2447-2452, Dec. 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SIMULACIÓN DE LA MANO HUMANA MEDIANTE MATLAB/SIMMECHANICS

Dorin-Sabin Copaci, Juan Carlos García Pozo,
Antonio Flores-Caballero, Dolores Blanco

Avda. de la Universidad, 30 Leganés (Madrid)
dcopaci@ing.uc3m.es, jcgarciapozo@gmail.com, afcaball@ing.uc3m.es, dblanco@ing.uc3m.es

Resumen

La mano humana es una de las extremidades más complejas del cuerpo humano. Decenas de pequeños huesos, tendones y músculos nos permiten, golpear, agarrar, apretar, girar y muchos más movimientos distintos que nos permiten realizar multitud de tareas en la vida diaria.

En este artículo se presenta la construcción del modelo y los primeros resultados de la simulación de la mano humana, mediante las herramientas Matlab/Simulink® y Matlab/SimMechanics®, que a posteriori podrá servir como modelo dinámico 3D para simulaciónes músculo-esqueléticas donde la componente humana es necesaria.

Palabras clave: Mano, modelo músculo-esquelético, simulación, SimMechanics, biomecánica

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años gran número de proyectos de investigación se están centrado en la robótica asistencial y de rehabilitación donde el dispositivo robótico está en contacto directo con el cuerpo humano. En este aspecto, existe la necesidad de modelos musculo-esqueléticos que permitan simular la biomecánica del cuerpo humano, y permitan analizar el conjunto simulado del dispositivo robótico - cuerpo humano. Actualmente, hay algunos programas que permiten la simulación de la biomecánica del cuerpo humano como: AnyBody [10], MSMS [3] [9], BoB [13], OpenSim and SIMM [11], [12]. La mayoría de estos programas de simulación dinámica no incluyen la simulación de la mano humana, solo permitiendo la simulación hasta la muñeca.

Para la realización de este proyecto hemos tomado como referencia modelos ya implementados anteriormente [7] y otros proyectos similares como por ejemplo el modelo realizado en OpenSim, una herramienta de libre acceso para el modelado y simulación de la biomecanica del cuerpo humano.

Un problema del modelo de OpenSim es que no están implementados todos los músculos que el movimiento de la mano involucra. Se centra aquellos cuyo origen está en el antebrazo y sus inserciones en la mano propiamente dicha. Pero los músculos cuyos orígenes se encuentran en la propia mano como por ejemplo, los músculos interóseos palmares o interóseos dorsales, cuya función es la abducción y aducción de los dedos, no se encuentran en dicho modelo, por lo que pierde ciertos rangos del movimiento de la mano.

Por otra parte, a la hora de simular junto con otros modelos (por ejemplo exosqueletos o actuadores) desarrollados en otras herramientas, la tarea de simulación se convierte en un problema complejo con OpenSim, no es trivial.

En el presente proyecto se han implementado la totalidad de los músculos que el movimiento de la mano involucra. Además, las articulaciones de los dedos han sido construidas en función de la biomecánica del cuerpo humano.

La estructura de este artículo es la siguiente: en la primera parte se presenta el objetivo de este artículo, en la sección 2 se presenta el método de desarrollo del modelo de la mano, tanto el modelo esquelético como también los modelos de los músculos. En la tercera parte se presentan los resultados preliminares después de la simulación; y en la última sección se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado hasta el momento.

2. MÉTODO DE DESARROLLO

En este apartado se va a poner en evidencia el método de desarrollo del modelo de la mano human presentándose los programas utilizados, el desarrollo del modelo esquelético así como el modelo de los músculos.

2.1. PROGRAMAS USADOS EN EL DESARROLLO

En función de los requisitos del proyecto de poder integrar en el sistema otros modelos de exosqueletos o modelos de actuadores y poder simular y analizar todo el conjunto, como entorno de desarrollo fue elegido Matlab con sus toolboxes co-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mo Simulink y Simescape. Algunos proyectos como MSMS o BoB usaron con éxito este entorno de desarrollo. Esto ofrece un medio accesible y fácil de entender para la construcción, simulación y análisis tanto para sistemas físicos y procesamiento de señales como también para otros ámbitos de aplicaciones.

2.2. MODELO ESQUELÉTICO DE LA MANO

Un primer paso consistió en recopilar ciertos datos biomecánicos de la mano humana: Grados de libertad (GDL) para cada articulación, rangos de movimiento de dichas articulaciones, dimensiones de cada segmento (hueso) y peso de cada segmento, los datos más relevantes se recogen en la tabla 1.

Cuadro 1: GDL y rango de movimiento de las articulaciones (Art.) [1]

Parte	Art.	GDL	Angulo flexión extensión	Angulo abducción aducción
Dedos	DIP	1	60	-
	PIP	1	100	-
	MCP	2	90	60
Pulgar	IP	1	85	-
	MCP	2	50	30
	CMC	2	120	45

Donde el DIP representa las falanges distales, PIP las falanges medias, MCP las falanges proximales, IP la falange distal del pulgar y CMC el metacarpo.

2.2.1. Dimensiones de los segmentos

En el cálculo de la longitud de los segmentos se han utilizado los métodos paramétricos presentados en [4]. En función de estos métodos se ha calculado la longitud de cada segmento que va ser utilizado a continuación para el desarrollo del modelo de la mano humana.

2.2.2. Masa de los segmentos

Para el cálculo del valor de la masa de cada segmento se ha propuesto una aproximación en función del peso total de la mano y el área de cada segmento. Esta solución de aproximación se ha desarrollado con el objetivo de poder elegir entre una simulación que tiene en cuenta solo el peso de los segmentos de la mano y otra simulación que tiene en cuenta tanto el peso de los segmentos como también el peso de los tejidos. En los todos los cálculos utilizados en la aproximación de la masa de cada segmento se ha tenido en cuenta que la masa total de la mano humana, tiene un porcentaje de aproximativamente 0.7 % de la masa total del individuo[2].

Para ambos métodos utilizamos el área de cada segmento de la mano, que ha sido medido separando cada uno de los segmentos en polígonos simples y sumando sus áreas.

El primer método no tiene en cuenta la masa de los tejidos, solamente el porcentaje de área del segmento con respecto al área total. De esta manera, la masa de cada segmento es calculada con la siguiente ecuación (1):

$$M_s = M_t * 0{,}007 * \frac{A_s}{A_t} \quad (1)$$

Donde M_s representa la masa del segmento, M_t representa la masa total del individuo, A_s es el área del segmento y A_t es el área total de la mano.

En el segundo método se quiere tener en cuenta la masa de los tejidos de la mano: carne, músculo, etc. Este método nace de la simple observación de la mano y de la observación de donde están situados los músculos de la mano mayoritariamente y demás tejidos. Por ello, en las secciones donde hay más músculo se utiliza una ponderación más elevada, en detrimento de las secciones donde los tejidos sean menores.

Cuadro 2: Porcentajes de tejido y número de huesos de cada zona

Zonas	%Tejido	N^o huesos
Huesos del carpo derecha	35	3
Huesos del carpo izquierda	35	4
Huesos del carpo centro	30	6
PIPS, IPS y DIPS	0	-

Basándonos en los datos de la Tabla 2 desarrollamos la siguiente ecuación, para el cálculo del peso de cada segmento del segundo método, donde el 0.3 % de la masa total lo van a representar los tejidos de la mano y el 0.4 % restante lo representará la relación de áreas como en el método anterior:

$$M_s = (M_t * 0{,}004 * \frac{A_s}{A_t}) + (M_t * 0{,}003 * \frac{x\,\%}{n}) \quad (2)$$

Donde M_s representa la masa del segmento, M_t representa la masa total del individuo, A_s es la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

área del segmento, A_t es la área total de la mano, $x\,\%$ el procentaje del tejido y n el número de los huesos.

2.2.3. Implementación en SimMechanics

El siguiente pasao consistió en la implementación del modelo esquelético en Matlab-SimMechanics.

Cada sección está representada por un bloque como se observa en la Figura 1.

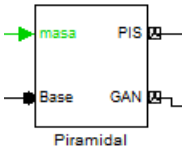


Figura 1: Ejemplo de una sección

El bloque desarrollado para cada segmento consiste en una serie de entradas y salidas necesarias conectarlo con las demás secciones de la mano así como también la entrada que proporciona el peso paramétrico de este segmento. Esta última entrada tiene dos valores, uno es la masa del sujeto y el otro es 0 ó 1 dependiendo del método que se quiera utilizar para el cálculo de la masa de la sección.

Ya en el interior del bloque encontramos varios elementos, Figura 2. Por un lado el bloque de función que sirve para el cálculo de la masa explicado anteriormente, que se conecta al "body"(en la figura2 el bloque Piramidal que representa el hueso piramidal), que representa la sección, mediante un bloque "Variable mass & inertia actuator".

El propio "body", en el cual se escriben las coordenadas que lo representan con respecto a la unión con la sección anterior.

Por último encontramos el tipo de unión entre el elemento anterior y el actual y que, dependiendo de los grados de libertad de la articulación, puede ser de varios tipos. Los más comunes: Weld (0GDL), revolute (1GDL) y universal (2GDL).

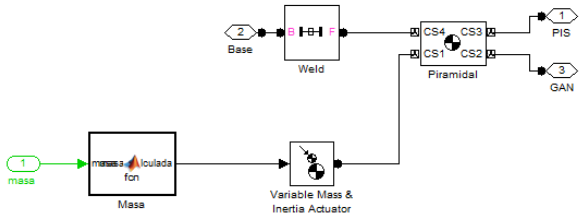


Figura 2: Ejemplo del interior de un bloque de sección

Con estos elementos y conectándolos entre sí se creará el modelo esquelético de la mano cuyo resultado se muestra en la Figura 3.

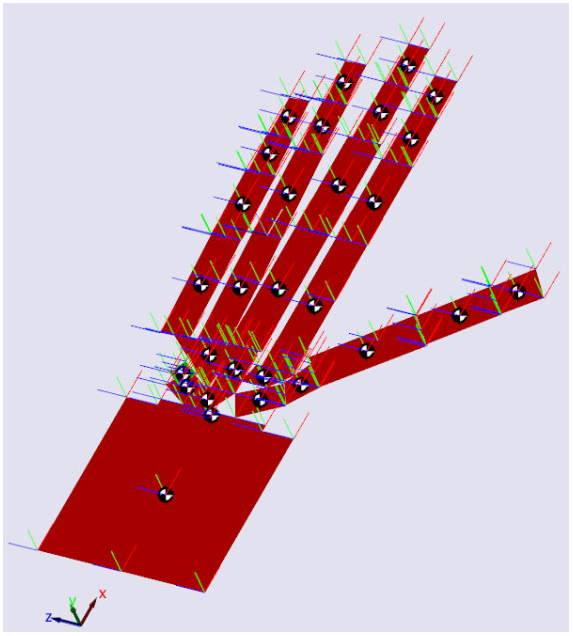


Figura 3: Estructura esquelética de la mano. Animación en SimMechanics

2.3. MODELO MUSCULAR DE LA MANO BASADO EN EL MODELO HILL

El modelo muscular implementado en este trabajo se está basando en el modelo Hill-Zajac [7] y se explica a continuación.

2.3.1. Modelo Hill

El modelo Hill considera los músculos un modelo simple de tres componentes a tener en cuenta: nivel de activación muscular y las relaciones de fuerza-longitud y fuerza-velocidad, así como un índice de la arquitectura de los músculos.

El modelo considera un elemento contráctil (CE), que es el componente básico que genera la fuerza, un elemento elástico en paralelo (PEE), que es el responsable de la fuerza pasiva generada por el músculo cuando se estira y un elemento elástico en serie (SEE), que representa el tendón del músculo y se considera inextensible (Figura 4).

La tensión en los tendones es insignificante para la magnitud de las fuerzas desarrolladas por los músculos [5]. Por tanto la fuerza desarrollada por un músculo puede escribirse como:

$$F = F_{max}(F_{CE} + F_{PEE}) \tag{3}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

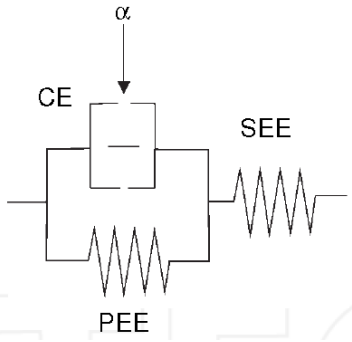


Figura 4: Modelo muscular de Hill

Donde F_{CE} y F_{PEE} son las fuerzas normalizadas proporcionadas por los elementos CE y PEE respectivamente. La fuerza producida por CE está relacionada con la arquitectura muscular y es una función de la longitud del músculo (l_{CE}), la velocidad de contracción (V_{CE}) y el nivel de activación muscular (α, de 0 a 1), que es controlado por el sistema nervioso central [8].

$$F_{CE} = \alpha * F_l(I_{CE}) * F_v(V_{CE}) \quad (4)$$

Donde F_l y F_v son las relaciones adimensionales fuerza-longitud y fuerza-velocidad. Existe una curva en forma de campana característica entre la fuerza y la longitud del músculo. Para modelar esta dependencia, la expresión propuesta por [8] es:

$$F_l(\epsilon, i_a) = e^{-[\frac{(\epsilon+1)^{0,96343(1-\frac{1}{i_a})}-1,0}{0,35327*(1-i_a)}]} for\ i_a < 1 \quad (5)$$

$$F_l(\epsilon, i_a) = e^{[2,727277*ln(\epsilon+1)]^2} for\ i_a = 1 \quad (6)$$

Donde i_a es el índice de la arquitectura del músculo, que se define como la relación entre la longitud de la fibra muscular y la longitud del vientre muscular y ϵ es la tensión del músculo debido a su alargamiento con respecto a l_o (longitud del músculo en condiciones óptimas).

La fuerza que un músculo puede ejercer disminuye cuando la velocidad de contracción de las fibras musculares aumenta. Para modelar esta dependencia la expresión propuesta por [6] ha sido:

$$F_v(\eta) = \frac{0,1433}{0,1074 + e^{-1,409*sinh(3,2*\eta+1,6)}} \quad (7)$$

Donde η es la velocidad del elemento contráctil normalizada, dada por la relación entre la velocidad de alargamiento del músculo (ϵ) y su valor máximo ($\epsilon_{max} = 2{,}5s^{-1}$) [8].

La fuerza generada por PEE es una función solo de la longitud. Se ha considerado una relación exponencial en este caso, donde b_1 y b_2 son constantes:

$$F_{PEE} = b_1 * e^{b_2*\epsilon} + b_1 \quad (8)$$

Además de las ecuaciones expuestas necesitamos unos parámetros representativos de cada músculo: fuerza óptima del músculo (FOM), longitud óptima del músculo (LOM) y el ángulo de las fibras musculares con respecto a su inserción (θ). Estos parámetros se han obtenido del modelos similares como el de OpenSim[1].

2.4. Implementación en Simulink

Con todos los datos obtenidos, solo queda implementar en Matlab-Simulink el modelo de cada uno de los músculos que participan en el movimiento del presente modelo.

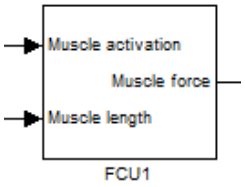


Figura 5: Ejemplo de bloque de modelo muscular en Simulink

Este modelo tiene dos entradas:

- *Muscle activation* corresponde al nivel de activación muscular (α, de 0 a 1), y en esta entrada se colocará un generador de pulsos.
- *Muscle lenght* es la longitud del músculo en cada instante. Para calcular esta longitud aplicamos la raíz de la suma de la diferencia al cuadrado en X,Y y Z, entre el punto de inserción del músculo y el punto de origen:

$$M_l = \sqrt{(x_i - x_o) + (y_i - y_o) + (z_i - z_o)} \quad (9)$$

Donde el M_l es la longitud del musculo, y x_i, y_i, z_i, x_o, y_o y z_o son las coordenadas del punto de inserción y del origen del músculo respectivamente .

[1] https://simtk.org/home/wrist-model

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Dentro del bloque muscular se realizarán las operaciones expuestas anteriormente, para finalmente obtener una única salida, que será la fuerza ejercida por el músculo y que se conectará al "body"del segmento correspondiente, donde se encuentre la inserción del músculo, mediante un "body actuator".

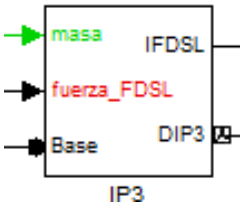


Figura 6: Ejemplo de un bloque de sección con una entrada de la fuerza de un músculo

3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Uno de los aspectos clave de los programas de simulación muscular es la validación de las predicciones en fuerza. No de pocas veces esto es una de las tareas más complicadas. En este artículo vamos a presentar unos resultados preliminares trabajando sobre el dedo índice en la tarea de flexión de MCP.

La configuración del entorno de simulación para realizar la flexión MCP del dedo índice es la siguiente:

- El entorno de simulación tiene en cuenta fuerza gravitacional.
- La posición inicial de la mano considerado todos los ángulos en la posición 0, es totalmente extendida como se presenta en la figura 3.
- Para poder activar el músculo encargado con la flexión de dicho segmento, se utiliza un generador de pulsos cuya amplitud varía entre 0 (cuando el músculo está relajado) y 1 (cuando el músculo está excitado a máximo).
- Para poner en evidencia el comportamiento del músculo, dado que todavía no está activado el músculo de extensión en esta prueba preliminar, en dicha articulación se va a colocar un sistema de torsión muelle-amortiguador que recupera la posición 0.

Los primeros resultados de la simulación pueden verse en la figura 7.

Como se puede observar en la figura 7, el ángulo de la articulación corresponde al periodo de excitación del músculo representado por la fuerza

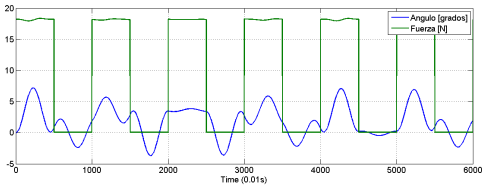


Figura 7: Angulo de la articulación del MCP del índice y la fuerza generada del musculo en flexión.

generada en este. La diferencia de fuerza en el periodo de activación es debida al cambio de longitud del músculo en función del movimiento de los segmentos.

Por otra parte, la respuesta del ángulo de la articulación esta influenciada por la constante de elasticidad y del amortiguador del sistema muelle amortiguador.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la construcción de un modelo músculo-esquelético de la mano humana muy completo, que puede simular prácticamente la totalidad de los movimientos básicos que esta realiza y de esta manera poder analizar cada uno de ellos.

Este trabajo pretende mejorar ciertos aspectos en los que otros modelos mencionados no habían profundizado. Esto ha sido posible gracias a la implementación de cada uno de los músculos que están implicados en los movimientos que la mano realiza, sin hacer excepciones. También el entorno de desarrollo empleado supone una ventaja con respecto a los demás modelos ya que nos permitirá conectar nuestro modelo con otros ya implementados de exoesqueletos o actuadores de manera más sencilla.

En este artícuo solo se han presentado las bases de construcción del modelo de la mano y unos primeros resultados de la fuerza de los músculos. Esto puede servir de base y modelo para futuros proyectos: Mejoras de cada uno de los movimientos, estudio de los parámetros musculares que determinan los rangos de fuerza de cada uno de los músculos, mejorando estos y aproximándolos así más a la realidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad gracias al proyecto HYPER del programa CONSOLIDER-INGENIO2010; y por la Comunidad de Madrid a través del programa RoboCity2030-II-CM.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] C. A. Quinayás Burgos; Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres; Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán, Enero de 2010

[2] Clauser, C.E.; Mcconville; J.T. y Young, J.W., 1969. Weight, volume and center of mass of segments of the human body. AMRL-TR-69-70. Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio

[3] Davoodi, R.; Urata, C.; Todorov, E.; Loeb, G.E; Development of clinicianfriendly software for musculoskeletal modeling and control Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE2004

[4] Esteban Peña Pitarch; Virtual Human Hand: Grasping Strategy and Simulation, PhD Thesis, Universitat Politécnica de Catalunya (UPC), October 2007

[5] Goldstein, S.A., Armstrong, T.J., Chaffin, D.B. and Matthews, L.S. (1987). Analysis of cumulative strain in tendons and tendon sheaths. Journal of Biomechanics, 20 (1), pp. 1-6.

[6] Hatze, H., 1981. Myocibernetic control models of skeletal Muscle. University of South Africa, Pretoria.

[7] Joaquín L. Sancho-Bru et al.; Towards a Realistic and Self-Contained Biomechanical Model of the Hand, Universitat Jaume I Spain

[8] Kaufman, K.R., An, K.N., Litchy, W.J. and Chao, E.Y.S., 1991. Physiological prediction of muscle forces I. Theoretical formulation. J. Neuroscience 40 (3), 781-792.

[9] Khachani,M.; Davoodi, R.; Loeb, G; Musculo-Skeletal Modeling Software (MSMS) for Biomechanics and Virtual Rehabilitation, IEEE Trans. Biomedical Eng. 2000

[10] Michael Damsgaard; John Rasmussen; Soren Torholm Christensen; Egidijus Surma; Mark de Zee; Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System 2006

[11] Scott L. Delp; Frank C. Anderson; Allison S. Arnold; Peter Loan; Ayman Habib; Chand T. John; Eran Guendelman; Darryl G. Thelen; OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement IEEE Trans. Biomed. Eng.54:1940-1950 2007

[12] Scott L. Delp; Peter Loan; A graphics-based software system to develop and analyze models of musculoskeletal structures. Comput. Biol. Med. 25:21-34 1995

[13] Shippen, J.M.; May, B.; Calculation of Muscle Loading and Joint Contact Forces in Irish Dance; Journal of Dance Medicine and Science2010

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Mejora de la localización de un cuadricóptero mediante la fusión de su sistema de metrología y un GPS

José Luis Racero, Santiago Sastre, josrarob@etsid.upv.es , sansasca@etsii.upv.es
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universitat Politècnica de València.
Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó, {alvig2, sergarro, jpico}@upv.es
Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen

El objetivo de este proyecto es la instrumentación del AR Drone con un Sistema de Posicionamiento Global, con el fin de mejorar el cálculo de su localización. Se ha implementado un Filtro de Kalman para la fusión de los datos procedentes de los sensores del cuadricóptero y del GPS. Este filtro está disparado por eventos, lo que quiere decir que el algoritmo de cálculo de la posición trabaja de manera diferente dependiendo de si hay o no señal de GPS.

El sistema de comunicación WiFi se ha modificado para gestionar correctamente la información procedente de los dos dispositivos así como para seleccionar qué tipo de topología de comunicación debe implementarse. Dependiendo del algoritmo de control seleccionando, la topología de comunicación puede ser centralizada o descentralizada.

Palabras clave: UAV, control de formación, GPS, Filtro de Kalman, generación de trayectorias

1. Introducción

Durante los últimos años se ha puesto de moda la utilización de los llamados "Vehículos Aéreos no Tripulados"(UAV por sus siglas en inglés). Hasta hace poco, su uso estaba reservado únicamente al ámbito militar, bien como espías de territorio enemigo, como señuelos o como bombarderos.
Esta tendencia ha ido cambiando, aplicándose a diversos campos de la vida cotidiana, como la vigilancia y la prevención de fallos/problemas en las líneas eléctricas, búsqueda y rescate de personas, envío de mercancía, o con fines recreativos, entre otros.
Para el desarrollo de este proyecto se trabaja con drones destinados a cumplir esta última función, siendo utilizado el modelo ARDrone 1.0 de Parrot, cuyas características serán descritas más adelante.
Se pretende mejorar la instrumentación propia de los drones, incorporando un sistema de posicionamiento global (GPS), con el fin de obtener datos de posición y velocidades más precisos que los proporcionados por el drone. Para ello se diseña una placa que integre este compenente y se incorpora a la plataforma ARDrone, a través del puerto serie.
Una vez hecho esto, se programa un filtro de Kalman para fusionar los datos procedentes del sistema integrado por el GPS y los controladores internos del ARDrone.
Por otro lado, existe la necesidad de diseñar un programa principal que gestione la comunicación entre el PC y el cuadricóptero, implementando el algoritmo de control elegido.
Todo ello es posible tras modificar el sistema de comunicación WiFi.

2. ARDrone

ARDrone es un cuadricóptero UAV comercializado por Parrot, de uso recreativo civil, que puede ser controlado a través de dispositivos móviles (Android y Apple) o mediante un ordenador.
Este dispositivo ha ido consiguiendo gran popularidad entre el público debido a su alta disponibilidad y a su precio asequible (en comparación con otros cuadricópteros de similares características), esto hace que se pueda encontrar una gran cantidad de información y documentación en internet sobre él, lo que es una gran ventaja a la hora de solucionar posibles errores. Además, ofrece una gran accesibilidad para poder modificar sus parámetros internos de configuración.
Su estructura mecánica está formada por cuatro rotores dispuestos en cruz y en cuyo centro se sitúa la batería. Cada par de motores opuestos giran en el mismo sentido, así, un par rota en sentido antihorario y el otro en el antihorario.
Cada rotor es accionado por un motor de corriente continua controlado por un microcontrolador. Para maniobrar, se cambian los ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada (roll, pitch y yaw). Variando

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la velocidad de los rotores izquierdo y derecho, se genera un movimiento de alabeo, lo que permite al cuadricóptero desplazarse sobre el eje X. Si se varía la velocidad de los rotores delantero y trasero, se consigue un movimiento de cabeceo, moviéndose sobre el eje Y. Para hacer que rote sobre sí mismo (movimiento de guiñada) los rotores han de girar a velocidades diferentes.

2.1. Especificaciones técnicas

La información mostrada a continuación ha sido obtenida de [6].

2.1.1. Especificaciones físicas

- **Dimensiones:**
- Con cubierta de protección 52.5 x 51.5 cm.
- Sin cubierta de protección 45 x 29 cm.
- Peso:
- Con cubierta de protección 420 g.
- Sin cubierta de protección 380 g.
- Velocidad de crucero: 5m/s - 18km/h.
- Techo máximo: Limitado por el alcance de la conexión Wi-Fi (entre 50 y 120 m).
- Alcance máximo: Limitado por la conexión Wi-Fi.
- Autonomía de vuelo promedio: 12 minutos.

2.1.2. Sistema informático integrado

- Microprocesador ARM9 RISC de 32 bits @ 468MHz.
- MemoriaDDR SDRAM de 128 MB @ 200 MHz.
- Sistema operativo con núcleo Linux.
- Conector USB/RS-232.

2.1.3. Sistemas de guía inercial

- Acelerómetro de 3 ejes.
- Giróscopo de 2 ejes.
- Giróscopo de precisión de 1 eje para el control de guiñada.

2.1.4. Sistema de seguridad

- Casco para vuelo en interiores con cubierta para las hélices.
- Bloqueo automático de las hélices en el caso de colisión.
- Interfaz de control con botón de emergencia para detener los motores.

2.1.5. Motores y alimentación

- 4 motores sin escobillas, girando a 3500 rpm con una potencia de 15W.
- Batería de ion de litio de 3 celdas, capaz de entregar 1000 mA/h con un voltaje nominal de 11.1V y que le permite una autonomía de vuelo de entre 12 y 14 minutos.
- Capacidad de descarga: 10C.
- Tiempo de carga: 90 minutos.

2.1.6. Cámara frontal

- Cámara con sensor CMOS de tipo gran angular de lente diagonal con 93º de amplitud.
- Resolución de 640x480 píxeles (VGA).

2.1.7. Cámara ventral

- Cámara con sensor CMOS de alta velocidad de lente diagonal con 64º de amplitud.
- Resolución de 176x144 píxeles.
- Se utiliza como sensor de estabilización.

2.1.8. Altímetro por ultrasonido

- Frecuencia de emisión: 40kHz.
- Alcance de 6 metros
- Utilizado para la estabilización vertical.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.2. Firmware

Se ha trabajado con la versión de firmware 1.11.5, la más reciente que es compatible para el proyecto desarrollado. Para poder actualizar dicha versión, es necesario un cable USB adaptado para la conexión del puerto serie del AR Drone.
El proceso de actualización del firmware es relativamente sencillo, únicamente hay que enviar, a través del cable y mediante una serie de scripts, a la memoria del AR Drone la versión que queramos instalar. Estas versiones del firmware pueden ser descargadas directamente desde la página web del fabricante.
La comunicación entre el PC y el AR Drone se ha desarrollado mediante Putty, un servidor Telnet que funciona utilizando la conexión Wi-Fi. Desde ahí se podrán realizar las modificaciones al firmware que se requieran, así como ejecutar los programas en C que se han desarrollado para el cuadricóptero.

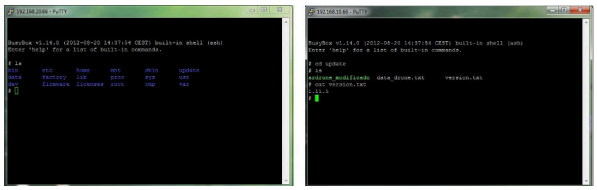


Fig. 1: Entorno de Putty

2.3. Comunicación puerto serie

Se realizaron una serie de pruebas de comunicación entre el puerto serie del drone y el puerto USB del ordenador. Lo que se pretendía comprobar es el correcto funcionamiento del puerto serie de nuestro cuadricóptero ya que, posteriormente, el receptor GPS irá conectado a través de este puerto.
Para llevar a cabo estas comprobaciones se ha utilizado RealTerm, que es un programa diseñado especialmente para la captura, control y depuración de datos binarios y otras secuencias de datos.

Con este programa, se puede seleccionar el puerto por el cual se va a enviar la información a través del ordenador, el número de unidades de datos por segundo (Baud rate) que se van a transmitir a por el puerto serie, la paridad de los datos enviados, los bits de parada, etc.
En la pestaña "Send"se elige el mensaje a enviar al drone.

Para poder leer dicho mensaje a través de Putty, es necesario ejecutar una aplicación, previamente diseñada, que sea capaz de leer el puerto correspondiente a través del cual Realterm se está conectando con el AR Drone.

2.4. Modelo del ARDrone

Se han desarrollado diferentes pruebas de vuelo con el cuadricóptero suponiendo que roll (desplazamiento en X) y pitch (desplazamiento en Y) están desacoplados. Estas pruebas han consistido en introducir una entrada previamente generada de roll (Fig. 2) y pitch (Fig. 3), delimitada por un cierto rango de amplitud y ancho de banda adecuado, y leer la señal a la salida del cuadricóptero.

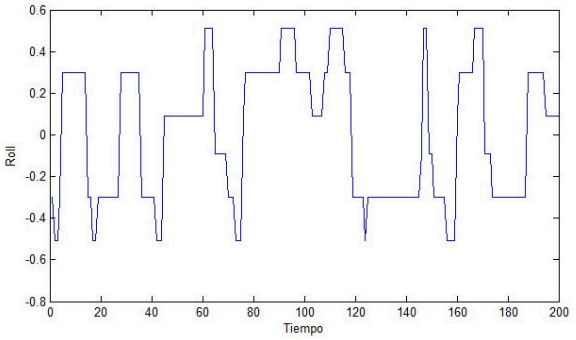


Fig. 2: Entradas de roll utilizadas para la identificación

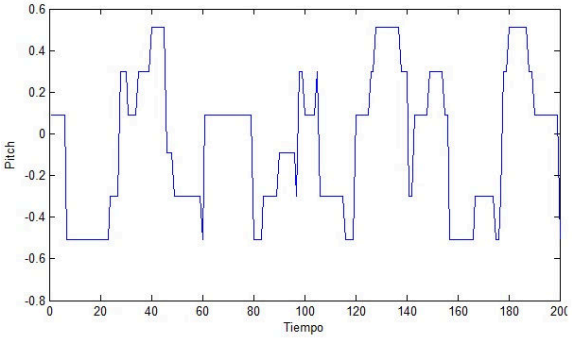


Fig. 3: Entradas de pitch utilizadas para la identificación

Una vez recibida la información de vuelo del AR Drone, se construye una tabla con los datos de interés para la posterior identificación, estos son: período, roll, pitch, roll_sat, pitch_sat, Vx y Vy.
Con los datos obtenidos y la herramienta "Ident"de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Matlab, se han identificado dos modelos ARX[2,1,5], en el que el denominador será de orden 2 y el numerador de orden 1 y habrá un retardo entre la señal de entrada y la de salida de 5 períodos de muestreo. El período de muestreo es de 0.06s. Estos modelos se han utilizado para implantar el Filtro de Kalman (Cap. 4), y tienen una estructura en la que están integradas tanto las velocidades como las posiciones.

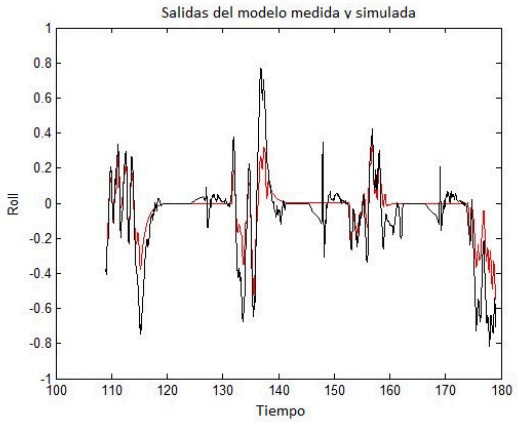


Fig. 4: Sistema de roll identificado

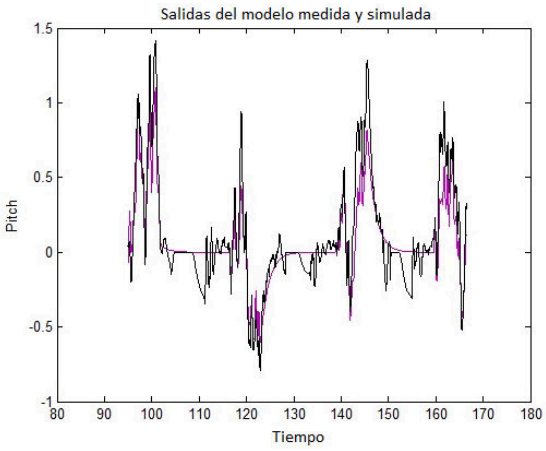


Fig. 5: Sistema de pitch identificado

En Fig. 4 se representa en negro la salida real y en rojo la salida simulada. En Fig. 5 se representa en negro la salida real y en morado la salida simulada.

Sabiendo el valor de los polos y ceros, se puede escribir la función de transferencia de los modelos en discreto:

$$G_{roll}(z^{-1}) = \frac{60.79z^{-5}}{1 - 1.38z^{-1} + 0.4131z^{-2}} \quad (1)$$

$$G_{pitch}(z^{-1}) = \frac{-99.83z^{-5}}{1 - 1.437z^{-1} + 0.4557z^{-2}} \quad (2)$$

El siguiente paso es convertir la función de transferencia a espacio de estados. Las ecuaciones que intervienen en el sistema serán las siguientes:

$$\begin{cases} X_{k+1} = a_1 \cdot x_k + b_1 \cdot u_k \\ Y_k = c_1 \cdot x_k + d_1 \cdot u_k \end{cases} \quad (3)$$

Introduciendo los datos correspondientes en Matlab se obtienen las representaciones de roll y pitch en espacio de estados:

Roll:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 1.38 & -0.8262 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 32 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 30.4 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

Pitch:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 1.437 & -0.4557 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -12.48 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

Es necesario construir un modelo en el que también se incluya la posición, ya que cuando se reciba información procedente del GPS, habrá que incluir la posición en las matrices correspondientes del Filtro de Kalman.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Roll:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 1.38 & -0.8262 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 30.395 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 32 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 30.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

Pitch:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 1.437 & -0.4557 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -12.479 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -12.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (11)$$

3. Sistema de localización y rumbo (GPS + brújula)

Se han tenido en cuenta una serie de características a la hora de seleccionar el GPS y la brújula más adecuados para nuestra aplicación.

3.1. GPS

Se ha buscado un GPS cuyo montaje sea superficial (SMD), que incorpore antena, con el mayor número de canales posible y con protocolo I2C. El elegido ha sido el "GPS Receiver A2235-H"de la compañía "Maestro Wireless Solutions". Este es un dispositivo de dimensiones muy reducidas (18mm x 16mm x 7mm), lo cual es fundamental para el desarrollo del proyecto, ya que va a ir incorporado en el extremo del ARDrone, donde está situada la cámara.
Para la obtención de la posición, puede conectarse hasta con 48 satélites al mismo tiempo, así que en condiciones normales, va a disponer de información suficiente para determinar correctamente su latitud y longitud.
El puerto serie, por defecto, transmitirá a 4800 baudios, con 8 bits de datos sin paridad y 1 bit de parada.

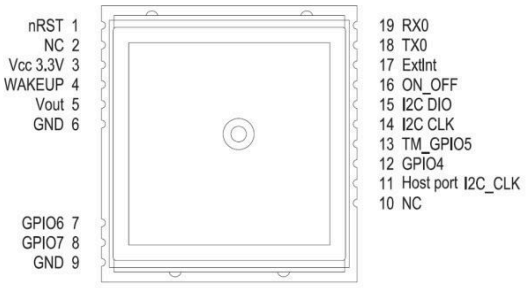


Fig. 6: Pines del receptor GPS

La información perteneciente al GPS ha sido obtenida de [5].

4. Filtro de Kalman

4.1. Introducción

El Filtro de Kalman [4], llamado así por su desarrollador Rudolf E. Kalman, es también conocido como Estimador Cuadrático Lineal - LQE por su siglas en inglés (Linear Quadratic Estimator), es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporcionan los medios para una eficiente estimación computacional (de manera recursiva) del estado no medible de un proceso. [12]

El algoritmo trabaja en dos etapas, en la primera, el filtro realiza estimaciones de las variables de estado actuales junto con sus incertidumbres. Una vez los datos de la siguiente medida (la cual va a tener un error, incluido ruido aleatorio) son observados, estas estimaciones son actualizadas utilizando una media ponderada, el peso de la cual es directamente proporcional a la exactitud de las medidas. Las ecuaciones dependen únicamente de la medida anterior y la actual. Una de las ventajas que esto implica es el considerable ahorro en memoria a la hora de ser implementado por un computador.

Las ecuaciones que intervienen en la implementación del Filtro de Kalman son las siguientes:

- Ecuaciones de actualización del tiempo

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T$$

- Ecuaciones de actualización de las medidas

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_K P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

4.2. Programa en Matlab

Se parte del modelo en espacio de estados visto anteriormente (4),(5),(6),(7) para poder introducirlo de forma matricial en el entorno de Matlab, pero utilizando el modelo extendido.

Una vez representado el sistema completo en espacio de estados, se procede a definir las matrices que van a intervenir en el filtro de Kalman.
Se van a utilizar las llamadas "ecuaciones de predicción" y las "ecuaciones de corrección". Empezando por las primeras, se lleva a cabo el siguiente proceso:

- En primer lugar se proyecta el estado hacia adelante

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

- A continuación se proyecta la covarianza del error hacia adelante.

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

- Siguiendo con las ecuaciones de corrección, primero se calcula la ganancia de Kalman

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R}$$

- Después se actualiza la estimación utilizando las medidas z_k

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

- Finalmente se actualiza la covarianza del error:

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

A partir de aquí se vuelve a repetir el bucle, empezando por la actualización del tiempo (predicción) y acabando por la actualización de las medidas (corrección).

5. Simulaciones

Se han realizado diversas simulaciones. Primero, utilizando el sistema dado por las funciones de transferencia (1) y (2). Se ha generado una trayectoria aleatoria, la cual ha de seguir el AR Drone.

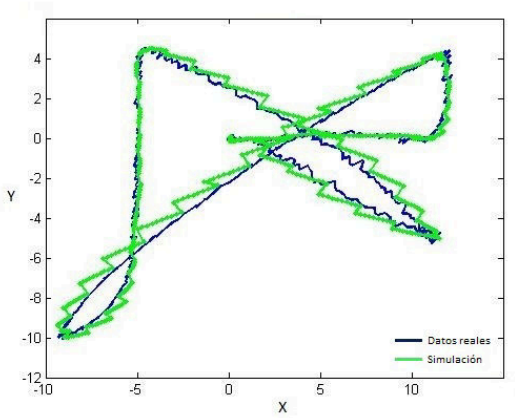


Fig. 7: Trayectoria del AR Drone en la simulación

En Fig. 7 se puede apreciar cómo el cuadricóptero sigue una trayectoria previamente generada (línea azul), utilizándola como referencia. La forma característica de la trayectoria simulada (línea verde) se debe a que el drone obtiene su posición a partir de las velocidades leídas. Cuando la diferencia de posición entre la calculada por el drone y la obtenida por el GPS supera un valor determinado, previamente establecido, la posición será calculada y corregida a partir la señal procedente del GPS.

En esta otra figura aparecen las velocidades en X e Y del AR Drone durante el seguimiento de la trayectoria generada:

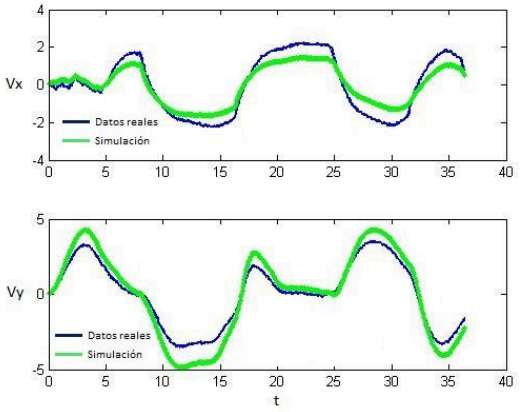


Fig. 8: Velocidades en X e Y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Como se aprecia en Fig. 8, la trayectoria y velocidades que sigue el cuadricóptero se aproximan bastante a las generadas aleatoriamente. Esto es un buen indicador de que el filtro está correctamente implementado.

Después de esto se realizan unas simulaciones con el modelo identificado en el apartado 2.5. Como en la simulación anterior, se ha generado una trayectoria aleatoria. Se muestran dos simulaciones, una sin datos de GPS y otra con datos de GPS. El resultado es el siguiente:

Sin señal de GPS:

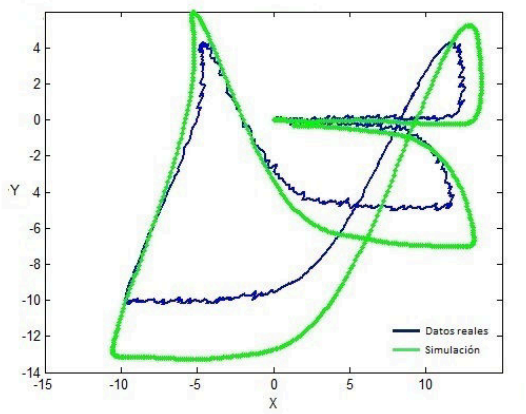


Fig. 9: Trayectoria del AR Drone en la simulación sin senal de GPS

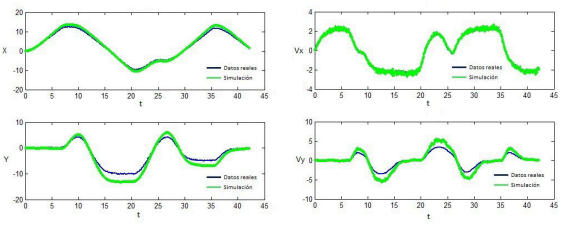


Fig. 10: Posiciones y velocidades en X e Y sin senal de GPS

Con señal de GPS:

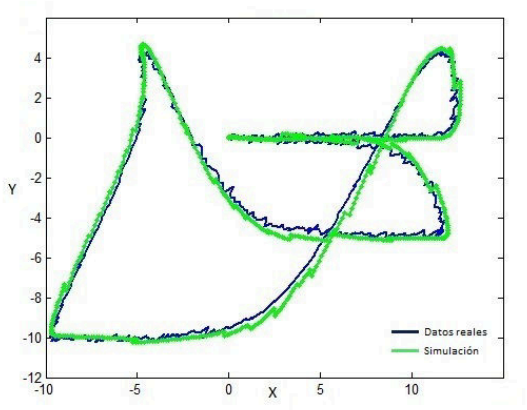


Fig. 11: Trayectoria del AR Drone en la simulación con senal de GPS

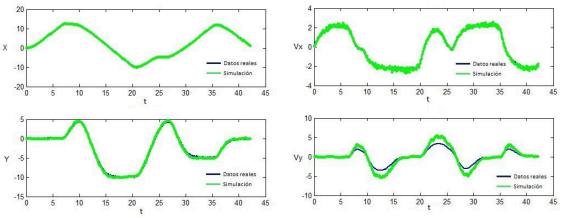


Fig. 12: Posiciones y velocidades en X e Y con senal de GPS.

La diferencia de exactitud entre ambas se debe a que, sin el GPS, el drone estima la posición X e Y a partir de la integración de la velocidad que está midiendo en cada período de muestreo. Esto hace que el error de posición se incremente.
Por otra parte, cuando el sistema de posicionamiento global está en funcionamiento, las posiciones vienen dadas por el mismo, lo que hace que, ademas de corregir el posible error de posición obtenido en Artículos previos por el drone, no sea necesario calcularlas mediante la integración de la velocidad, evitando así la acumulación de error.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

6. Conclusiones

En este trabajo, presentamos la fusión sensorial entre la Unidad de Medida Inercial (IMU por sus siglas en inglés) del drone y un sistema de posicionamiento que se ha incorporado formado por un GPS.
En primer lugar se ha implementado en Matlab un Filtro de Kalman disparado por eventos, el cual realizará una serie de cálculos u otros dependiendo de si se recibe señal procedente del GPS o no, para la simulación de la trayectoria que ha de seguir el cuadricóptero a partir de una referencia dada. Uno de los objetivos ha sido observar las diferencias entre las trayectorias generadas con y sin datos de GPS, compararlas y determinar el nivel de mejora que la inserción de este dispositivo aporta al sistema.

Una vez realizado esto, se ha diseñado un programa en C, que se ha incorporado al procesador del AR Drone, para poder utilizarlo en un escenario real.

Aunque los resultados de las simulaciones han sido satisfactorios, todavía se pueden mejorar y obtener una mayor precisión a la hora de calcular la posición del cuadricóptero. Esto hace que se pueda desarrollar en un futuro otra línea de trabajo que consista en obtener un modelo MIMO que integre roll y pitch o bien dos modelos SISO para roll y pitch de cada uno de los drones con los que se vaya a trabajar, ya que en este proyecto se ha realizado una identificación del modelo de un único drone y se ha generalizado para el resto de cuadricópteros.

Se puede afirmar pues, que la incorporación de un sistema de GPS a la plataforma AR Drone junto con la implementación de un filtro de Kalman para la fusión sensorial de los datos obtenidos por los diferentes dispositivos, aumenta notablemente la precisión del cálculo de posición del cuadricóptero, siendo esta una mejora muy interesante para futuras aplicaciones en las cuales se vaya a aplicar el uso de cuadricópteros.

Agradecimientos

Este trabajo es apoyado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España a través de los proyectos FEDER-CYCIT DPI2011-28112-C04-01 y TIN2011-28082.

Referencias

[1] Xavier Blasco, Sergio García-Nieto, and Gilberto Reynoso-Meza. Control autónomo del seguimiento de trayectorias de un vehículo cuatrirrotor. simulación y evaluación de propuestas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(2):194 – 199, 2012.

[2] Kingsley Fregene. Unmanned aerial vehicles and control: lockheed martin advanced technology laboratories. *Control Systems, IEEE*, 32(5):32–34, 2012.

[3] S García-Nieto, X Blasco, J Sanchís, J M Herrero, G Reynoso-Meza, and M Martínez-Iranzo. Trackdrone lite, 2012-07-05 2012.

[4] Rudolph Emil Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, 82(Series D):35–45, 1960.

[5] Maestro Wireless Solutions, 118 Connaught Road West, Hong Kong. *Maestro GPS Receiver A2235-H Product Brief.*, v1.4 edition, 2012.

[6] Stephane Piskorksi and Nicolas Brulez. *AR.Drone Developer Guide.* Parrot, revision sdk 1.6 edition, February 2011.

[7] Kimon P Valavanis. *Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy*, volume 33. Springer, 2008.

[8] Alejandro Vignoni. *Invariance and Sliding Modes. Application to coordination of multi-agent systems, bioprocesses estimation, and control in living cells.* PhD thesis, Universitat PolitÃ¨cnica de Valencia, May 2014.

[9] Alejandro Vignoni, Fabricio Garelli, Sergio García-Nieto, and Jesús Picó. Uav reference conditioning for formation control via set invariance and sliding modes. In *Estimation and Control of Networked Systems*, volume 3, pages 317–322, 2012.

[10] Alejandro Vignoni, Fabricio Garelli, and Jesús Picó. Coordinación de sistemas con diferentes dinámicas utilizando conceptos de invarianza geométrica y modos deslizantes. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(4):390–401, 2013.

[11] Alejandro Vignoni, Fabricio Garelli, and Jesús Picó. Sliding mode reference coordination of constrained feedback systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013.

[12] Greg Welch and Gary Bishop. An introduction to the Kalman filter. Class TR95-041 Notes. Department of Computer Sciences, University of North Carolina. 2004.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Optimización en dos etapas para la gestión energética en edificios

J.K. Gruber, F. Huerta, P. Matatagui, M. Prodanovic
Unidad de Sistemas Eléctricos, Instituto IMDEA Energía
Avda. Ramón de la Sagra, 3, 28935 Móstoles (Madrid)
jorn.gruber@imdea.org

Resumen

El aumento continuo de la demanda de energía y la integración de fuentes de energía renovable requieren estrategias de control avanzado para garantizar un suministro ininterrumpido y una alta eficiencia energética. Las empresas eléctricas y los operadores de las redes de transporte supervisan la generación y las redes para compensar cualquier diferencia entre la producción y la demanda. Con el cambio a la generación descentralizada y distribuida la gestión energética local puede contribuir a equilibrar las redes eléctricas. En este trabajo se presenta una gestión energética para edificios que determina la programación óptima de los diferentes componentes del sistema energético local. La optimización en dos etapas minimiza una función económica sujeta a las restricciones físicas del sistema y utiliza un horizonte deslizante. La gestión energética propuesta se implementa con programación lineal entera mixta y se aplica a un hotel emulado mediante sistemas electrónicos de potencia.

Palabras clave: gestión energética en edificios, respuesta a la demanda energética, optimización en dos etapas.

1. Introducción

El desarrollo industrial y la prosperidad de las sociedades modernas dependen fuertemente del suministro continuo de energía. Las empresas eléctricas y los operadores de las redes de transporte supervisan de forma permanente las instalaciones de producción y las redes de transporte con el objetivo de compensar inmediatamente cualquier diferencia entre generación y demanda. La transición reciente hacia la producción distribuida y las variaciones en la demanda dificultan mantener el equilibrio en las redes. El despliegue de contadores inteligentes y la disponibilidad de sistemas de almacenamiento asequibles fomentan el uso de gestión energética local. Los edificios, que constituyen hasta el 45 % del consumo de energía primaria en algunos países [1, 2], representan un elemento clave para mejorar la estabilidad de las redes y la calidad de la energía. La gestión energética para edificios permite reducir los efectos adversos de la generación intermitente y de las variaciones en la demanda y puede generar beneficios para empresas eléctricas, operadores de redes y clientes. Los precios variables en combinación con la gestión energética de edificios incentivan a los clientes a reducir su consumo durante las horas punta y desplazarlo parcialmente a períodos de baja demanda. Con los precios en tiempo real y la discriminación horaria existe la posibilidad de repercutir los costes reales asociados a la generación, transmisión y distribución en el consumidor final [3, 4]. Además, una conexión directa entre mayoristas y minoristas representa una condición necesaria para un mercado energético dinámico, eficiente y competitivo.

En los últimos años se ha intensificado la investigación en gestión energética para edificios por el creciente interés del sector industrial y de la comunidad científica. Muchas de las técnicas desarrolladas están enfocadas en la minimización de los costes de energía, incluyendo las estrategias de control predictivo basado en modelo [5, 6], sistemas multi-agente [7, 8], programación lineal entera mixta [9, 10] y teoría de juegos [11]. En [12] se ha propuesto un programa de ofertas flexibles basado en la maximización de la recompensa recibida por la reducción temporal de la demanda. Los participantes pueden responder a la oferta externa y reducir su consumo de energía con el objetivo de obtener algún ahorro monetario u otros beneficios. La gestión energética residencial propuesta en [13] usa un enfoque multi-objetivo que permite aumentar la estabilidad y mejorar el rendimiento a largo plazo. En [14] se ha desarrollado un algoritmo genético para minimizar tanto los costes de energía como los posibles retrasos en el uso de los electrodomésticos. Además, este enfoque permite la reducción del factor de pico de la demanda y contribuye positivamente a la estabilidad de la red.

En este trabajo se presenta un sistema de gestión energética para edificios basado en una estrategia de horizonte deslizante. La optimización en dos etapas incluye las predicciones de la generación local y el consumo y considera las limitaciones físicas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

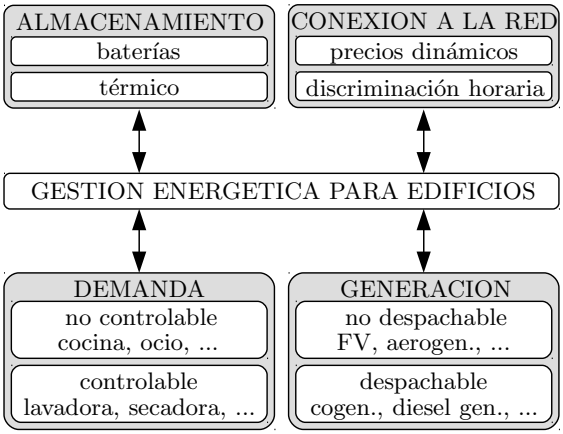


Figura 1: Esquema general de la gestión energética para edificios con los componentes principales.

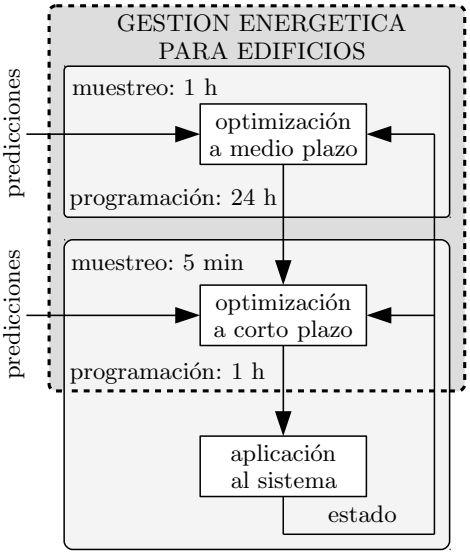


Figura 2: Estructura general de la optimización en dos entapas.

del sistema energético. La programación óptima se determina minimizando una función de coste en cada etapa de optimización. Los problemas de optimización, formulados mediante programación lineal entera mixta (MILP, del inglés *Mixed Integer Linear Programming*), se resuelven fácilmente con los correspondientes métodos numéricos.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe la gestión energética para edificios y la optimización en dos etapas. En la Sección 3 se define en detalle un caso de estudio para la verificación de la gestión energética propuesta. La Sección 4 describe la implementación del algoritmo de optimización y el banco de pruebas basado en sistemas electrónicos de potencia y presenta los resultados obtenidos en experimentos. Finalmente se exponen las conclusiones principales en la Sección 5.

2. Gestión energética para edificios

La gestión energética para edificios determina generalmente la programación óptima para todos los elementos del sistema de energía considerado. Los componentes típicos de un sistema de este tipo incluyen la generación local, la conexión a la red, los dispositivos de almacenamiento y la propia demanda (véase la figura 1). El enfoque de optimización combina aspectos locales y globales con el objetivo de calcular la mejor solución considerando una serie de restricciones, por lo general las limitaciones físicas del sistema energético. El uso de precios variables (precios dinámicos o discriminación horaria) incentiva a los consumidores a reducir el consumo de energía durante períodos de mucha demanda y permiten aplanar los picos de demanda. Predicciones detalladas del consumo y la generación local son importantes para asegurar un buen rendimiento de la gestión energética para los edificios. En los siguientes apartados se explican el desarrollo de la gestión energética para edificios y el enfoque de optimización elegido.

2.1. Idea general

El sistema de gestión energética para los edificios combina la información disponible a partir de fuentes internas y externas y resuelve el problema de optimización subyacente. La solución obtenida representa la programación óptima de los diferentes elementos del sistema energético como la generación despachable y no despachable, la demanda controlable y no-controlable, la conexión a la red y los dispositivos de almacenamiento. La estrategia de optimización considera dos categorías de cargas controlables: las desplazables y las que permiten modificar el nivel de potencia en un intervalo alrededor del valor nominal.

La elección del horizonte de optimización y del tiempo de muestreo es un punto importante que influye en la rapidez de la optimización y la calidad de la programación. La gestión energética para edificios propuesta está basada en una optimización en dos etapas que utiliza diferentes horizontes y tiempos de muestreo en cada etapa (véase la figura 2). En la primera etapa se define un problema de optimización con un horizonte de un día y un tiempo de muestreo de una hora. La solución a este problema representa la programación óptima del sistema energético del edificio a medio plazo. Esta programación se aprovecha en la segunda etapa para definir un nuevo problema de optimización con un horizonte de 1 hora y un tiempo de muestreo de 5 minutos. De la programación óptima a corto plazo, obtenida como solución al

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

segundo problema de optimización, solo se aplican los valores de la primera muestra al sistema energético considerado. En el siguiente instante se repite la optimización a corto plazo utilizando predicciones actualizadas. Después de 12 repeticiones, es decir, una hora completa, el procedimiento propuesto realiza una nueva optimización a medio plazo. En general, la gestión energética para edificios puede ser utilizada en un sistema de gestión integrada de edificios (BMS, del inglés *Building Management System*).

2.2. Optimización a medio plazo

La optimización a medio plazo calcula la programación óptima para el sistema energético considerada con un horizonte de un día ($h^m = 1\,\mathrm{d}$) y un tiempo de muestreo de una hora ($t^m = 1\,\mathrm{h}$). Las predicciones para las diferentes cargas y la generación no despachable, el estado de carga (SOC, del inglés *State of Charge*) de los sistemas de almacenamiento y los precios de la energía de las distintas fuentes (incluyendo precios negativos para posibles beneficios en el caso de exportar energía a la red principal) se emplean para definir el problema de optimización (véase la figura 3).

La solución a este problema representa la programación óptima para las cargas desplazables, los dispositivos de almacenamiento, la generación despachable y la conexión a la red[1]. La programación óptima de los dispositivos de almacenamiento y las cargas desplazables se utilizarán para definir el problema de optimización a corto plazo (véase la sección 2.3) y no se vuelven a calcular en la segunda etapa de la optimización. Este método garantiza una carga/descarga constante de los dispositivos de almacenamiento y una potencia constante de la demanda desplazable durante una hora. En cambio, se descarta la programación obtenida para la generación despachable y la conexión a la red y se calcula una nueva solución mediante la optimización a corto plazo.

2.3. Optimización a corto plazo

La optimización a corto plazo se lleva a cabo con un horizonte de una hora ($h^c = 1\,\mathrm{d}$) y un tiempo de muestreo de cinco minutos ($t^c = 5\,\mathrm{min}$). Como consecuencia se computa la programación óptima a corto plazo 12 veces entre dos optimizaciones sucesivas a medio plazo. El problema de optimización correspondiente se define utilizando los siguientes datos (véase la figura 4):

[1]Las cargas que permiten la regulación del nivel de potencia se consideran en la optimización a medio plazo como cargas no controlables y se usan sus valores nominales. La optimización de estas cargas se lleva a cabo más adelante en la optimización a corto plazo.

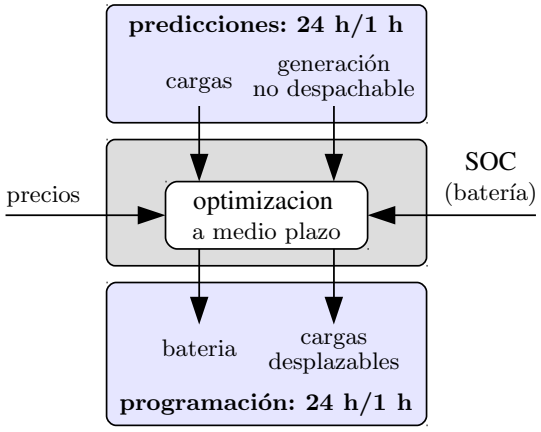


Figura 3: Esquema de la optimización a medio plazo.

- la programación optima de los dispositivos de almacenamiento y cargas desplazables (obtenidas de la optimización a medio plazo, véase la Sección 2.2)
- las predicciones con una hora de antelación para cargas no controlables, la generación no despachable y cargas que permiten la modificación del nivel de potencia [2]
- los precios de la energía de las distintas fuentes

Esta etapa de la gestión energética para edificios determina la programación óptima de los siguientes componentes del sistema considerado:

- las cargas controlables que permiten regular el nivel de potencia
- la generación despachable
- la conexión a la red principal

Es importante subrayar que la optimización a corto plazo no determina la programación de los dispositivos de almacenamiento ni de las cargas desplazables. Para estos componentes se remuestrean los resultados obtenidos en la optimización a medio plazo con un nuevo tiempo de muestreo de 5 minutos, es decir, se mantienen constantes estos elementos del sistema energético entre dos optimizaciones a medio plazo.

2.4. Problema matemático

El sistema de gestión energética para edificios basada en una optimización en dos etapas requiere

[2]Los valores nominales de la potencia de estas cargas controlables se utilizan para definir el problema de optimización. Los valores exactos en un intervalo alrededor de los valores nominales se calculan durante la optimización.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

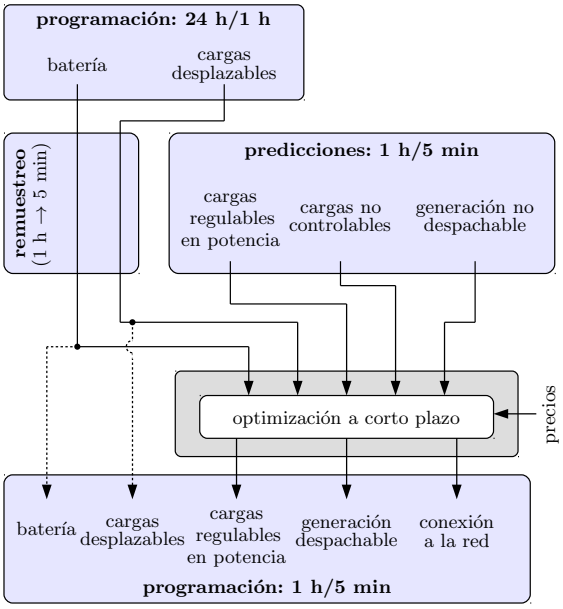


Figura 4: Esquema de la optimización a corto plazo.

la minimización de una función objetiva en cada una de las etapas. Los dos problemas de optimización tienen estructuras muy similares y contienen exclusivamente funciones y restricciones lineales. Además, en la definición de los problemas matemáticos se han empleado variables de decisión continuas y discretas. Por lo tanto, los problemas de optimización representan programas lineales enteros mixtos (MILP) que se resuelven con métodos numéricos especializados.

3. Caso de estudio

Con la idea de validar la gestión energética para edificios se ha elegido un caso concreto: un hotel de tamaño mediano. Los siguientes párrafos describen la configuración del hotel y las diferentes cargas consideradas.

El sistema energético del edifico está formado por los siguientes componentes: dos generadores diésel con potencias nominales de 10 kW y 20 kW, un sistema fotovoltaico con una capacidad instalada de 20 kWp y una conexión a la red limitada al rango de −30 kW (exportación) y 30 kW (importación). El hotel también cuenta con una batería con una capacidad total de 50 kWh y una carga/descarga máxima de −6 kW y 6 kW, respectivamente. Con el fin de evitar daños innecesarios o una degradación excesiva, se usa la batería sólo en el intervalo de 20 % (10 kWh) a 80 % (40 kWh), es decir, la capacidad efectiva se reduce a 30 kWh. Dependiendo de la fuente de energía, diferentes precios energéticos han sido considerados. En el caso de los dos generadores diésel se utiliza un precio de 0.5 €/kWh.

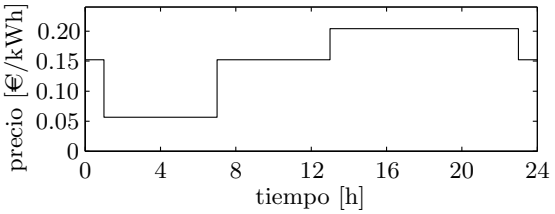


Figura 5: Tarifa supervalle considerada para la importación de la red principal.

elemento	potencia	precio
red	$[-30, 30]$ kW	ver fig. 5 (imp.) −0.04 €/kWh (exp.)
diésel 1	$\{0, 10\}$ kW	0.5 €/kWh
diésel 2	$\{0, 20\}$ kW	0.5 €/kWh
fotovolt.	$[0, 20]$ kW	0 €/kWh
batería	$[-6, 6]$ kW	0.005 €/kWh (cargar) 0.005 €/kWh (descar.)

Cuadro 1: Parámetros del sistema energético del hotel considerado (costes representados por precios positivos, beneficios por precios negativos).

La producción de energía por los paneles fotovoltaicos no genera costes adicionales, es decir, el precio es de 0 €/kWh. Además, la degradación de la batería tiene un coste de 0.005 €/kWh para la carga y descarga. El exceso de energía se exporta a la red con una bonificación de −0.04 €/kWh y para la importación se considera una tarifa supervalle (véase la figura 5) con los precios de 0.204 €/kWh, 0.152 €/kWh y 0.057 €/kWh. Los parámetros del sistema energético se resumen en la tabla 1.

En el lado de la demanda energética se incluyen algunas de las cargas más típicas de un hotel. Las cargas consideradas se pueden dividir en tres grupos principales: las cargas no controlables (cocina, habitaciones y otros), cargas desplazables (lavandería) y cargas regulables en potencia (iluminación y aire acondicionado). Las cargas regulables en potencia pueden variar entre el 90 % y el 110 % de los valores nominales. Un coste adicional de 0.4 €/kWh para reducciones o aumentos en el nivel de potencia evita variaciones no deseadas en estas cargas. La lavandería (carga desplazable) tarda 7 horas, con un intervalo admisible de 10:00 a 21:00 y un período predefinido de 14:00 a 21:00. El sistema de gestión energética determina el momento óptimo para la lavandería dentro del intervalo admisible.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

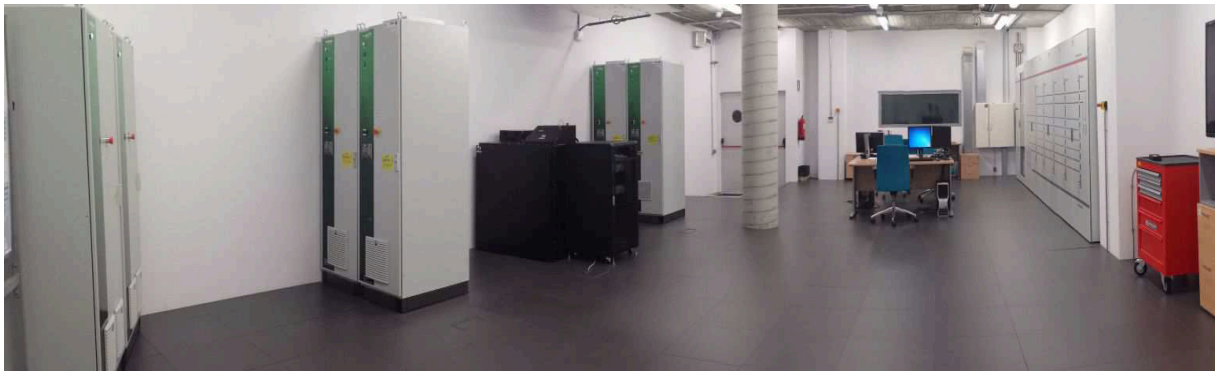


Figura 6: Laboratorio de alta potencia ubicado en las instalaciones de IMDEA Energía.

4. Experimentos

La gestión energética para edificios propuesta se aplica al hotel emulado en experimentos mediante sistemas electrónicos de potencia. Los siguientes apartados presentan la implementación del algoritmo de gestión, la emulación del hotel y los resultados obtenidos.

4.1. Implementación del algoritmo de optimización

La gestión energética para edificios con la optimización en dos etapas se ha implementado en Matlab (versión 2012a) en combinación con algunos paquetes de software adicionales. Se ha utilizado el paquete de software YALMIP [15] y su lenguaje de modelado avanzado para formular los problemas de optimización. El programa SCIP (del inglés *Solving Constraint Integer Programs*) [16] ha sido elegido por su amplia capacidad de manejar y resolver problemas de optimización, incluyendo los problemas de tipo MILP. Finalmente, el paquete de software OPTI [17] se utiliza como una interfaz entre Matlab y YALMIP por un lado y los métodos numéricos de SCIP por el otro.

La gestión energética para edificios propuesta se ha implementado en un ordenador personal con el sistema operativo Windows 7 (versión de 32 bits). El ordenador está basado en un procesador Intel Core i3-2330M a 2.20 GHz con 4 GB de memoria RAM.

4.2. Emulación con electrónica de potencia

El *Smart Energy Integration Laboratory* (SEIL) está ubicado en las instalaciones del Instituto IMDEA Energía y ha sido utilizado en la validación del método propuesto. El laboratorio (véase la figura 6) consiste en dos partes principales: el sistema de electrónica de potencia que está formado principalmente por seis convertidores de potencia

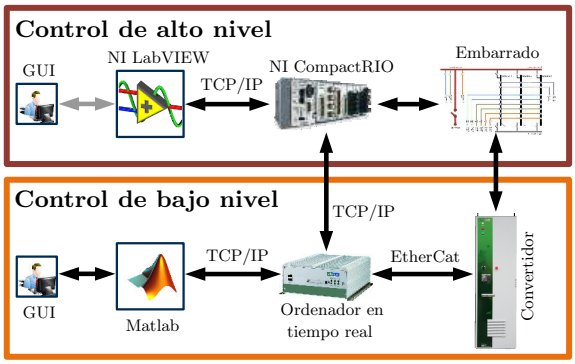


Figura 7: Esquema de control del laboratorio de alta potencia.

y un sistema de interconexión AC configurable, así como el sistema de control que está compuesto principalmente por ordenadores en tiempo real y controladores de automatización programable.

El sistema de potencia incluye cuatro convertidores AC/DC trifásicos de 15 kVA, dos convertidores AC/DC trifásicos de 75 kVA, un conversor DC/DC de 90 kW, un sistema de baterías de iones de litio de 47 kWh, una carga equilibrada programable de 30 kW, una carga desequilibrada programable de 10 kW por fase y un sistema de embarrado de corriente alterna trifásica configurable que permite simular hasta cinco redes aisladas o conectadas a la red principal.

El sistema de control se organiza en dos niveles jerárquicos como muestra la figura 7. El control de bajo nivel de los convertidores se realiza mediante ordenadores en tiempo real embebidos de tipo Nexcom NISE 6140. Para el diseño y la ejecución de los algoritmos de control se usan Matlab/Simulink y las herramientas ofrecidas por el fabricante de los convertidores, Triphase. Se usan dos NI CompactRIO 9022 y un PC convencional para el control de alto nivel y el programa NI LabVIEW para diseñar la conexión, el monitoreo y algoritmos de control.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en un experimento con la gestión energética para edificios propuesta. El experimento se ha realizado a una velocidad 60 veces mayor que tiempo real, es decir, un segundo del experimento corresponde a un minuto del hotel considerado.

El experimento se ha repetido con una estrategia de gestión energética muy simple que utiliza exclusivamente medidas en tiempo real y no tiene en cuenta ninguna predicción. La estrategia simple emplea solamente la conexión a la red, la batería y los generadores diésel para equilibrar la demanda y la generación y no puede modificar las cargas del sistema. Esta estrategia utiliza la conexión a la red como primera fuente de energía, después la batería y, finalmente, los generadores diésel. Los excesos de energía se utilizan en primer lugar para cargar la batería y el resto se exporta a la red principal.

Los resultados en la figura 8 muestran que la estrategia simple emplea los generadores diésel para satisfacer parte de la demanda. Además, una cantidad significativa de energía se exporta a la red principal. En contraste, la gestión energética para edificios propuesta adelanta la operación de la lavandería a 10:00 (véase la primera subimagen en la figura 8). Como consecuencia se puede cubrir la demanda energética con la generación no despachable, la conexión a la red y la batería sin necesidad de usar los generadores diésel. En el caso de la estrategia simple los costes totales ascienden a 67.92 € y el precio de energía a 0.201 €/kWh. La gestión energética propuesta reduce los costes a 47.30 € y el precio de energía a 0.142 €/kWh.

Es importante subrayar que las soluciones a los problemas de optimización se han podido calcular sin problemas dentro del tiempo de muestreo escogido. La optimización a medio plazo tardó entre $t^m_{min} = 0.40\,\text{s}$ y $t^m_{max} = 0.59\,\text{s}$ con un promedio de $t^m_{avg} = 0.48\,\text{s}$. El tiempo promedio para resolver el problema de optimización de corto plazo ha sido $t^c_{avg} = 0.47\,\text{s}$, con un mínimo de $t^c_{min} = 0.32\,\text{s}$ y un máximo de $t^c_{max} = 0.66\,\text{s}$.

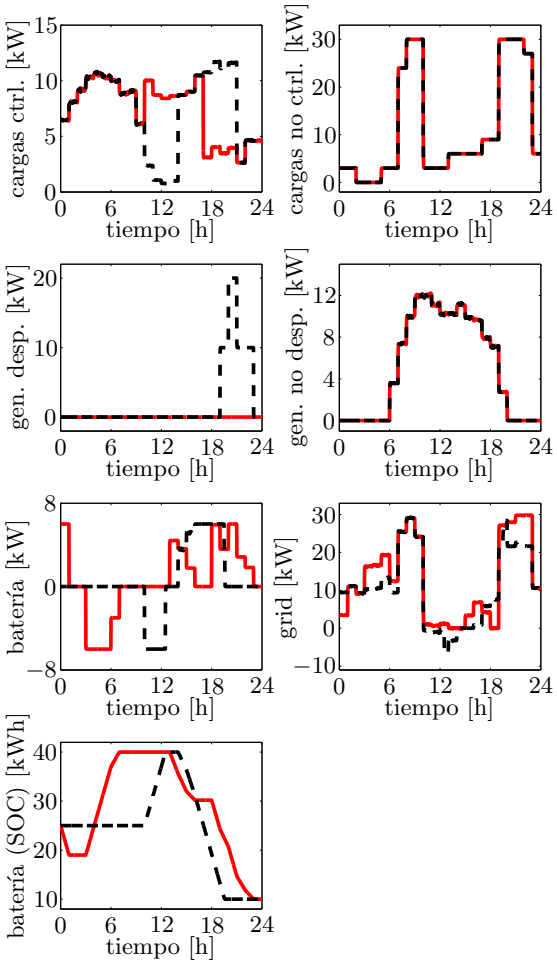


Figura 8: Resultados experimentales obtenidos con la gestión energética propuesta (línea sólida) y la estrategia simple (línea discontinua).

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una gestión energética para edificios basada en una optimización en dos etapas que considera las restricciones físicas del sistema energético. El uso de funciones y restricciones lineales y variables continuas y discretas permite representar los problemas de optimización como programas lineales enteros mixtos.

La programación óptima para los componentes del sistema energético se calcula en dos pasos sucesivos. En el primer paso se resuelve un problema de optimización a medio plazo con un horizonte de un día y un tiempo de muestreo de una hora. En el segundo paso, la programación de algunos componentes del sistema se recalculan para la próxima hora con un tiempo de muestreo de 5 minutos. El enfoque de dos etapas permite calcular la programación óptima para un horizonte largo (un día) y un tiempo de muestreo pequeño (5 minutos) resolviendo dos problemas de optimización con una complejidad computacional relativamente baja.

La gestión energética para edificios se ha implementado en Matlab y se han usado paquetes de software adicionales para resolver los problemas de optimización. Finalmente se ha aplicado la gestión energética propuesta a un hotel de tamaño mediano emulado mediante sistemas electrónicos de potencia. En los resultados se ha podido ver un buen comportamiento de la gestión energética y una mejora considerable en comparación con una estrategia de gestión energética muy simple.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Iwaro, J. y Mwasha, A. (2010) A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries. *Energy Policy*, **38**, 7744–7755.

[2] dos Santos, A. H. C., Fagá, M. T. W. y dos Santos, E. M. (2013) The risks of an energy efficiency policy for buildings based solely on the consumption evaluation of final energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **44**, 70–77.

[3] Tiptipakorn, S. y Lee, W.-J. (2007) A Residential Consumer-Centered Load Control Strategy in Real-Time Electricity Pricing Environment. *Proceedings of the 39th North American Power Symposium (NAPS '07)*, Las Cruces, NM, pp. 505–510.

[4] Mohsenian-Rad, A.-H. y Leon-Garcia, A. (2010) Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1**, 120–133.

[5] Chen, C., Wang, J., Heo, Y. y Kishore, S. (2013) MPC-Based Appliance Scheduling for Residential Building Energy Management Controller. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **4**, 1401–1410.

[6] Scherer, H. F., Pasamontes, M., Guzmán, J. L., Álvarez, J. D., Camponogara, E. y Normey-Rico, J. E. (2014) Efficient building energy management using distributed model predictive control. *Journal of Process Control*, **24**, 740–749.

[7] Asare-Bediako, B., Kling, W. L. y Ribeiro, P. F. (2013) Multi-agent system architecture for smart home energy management and optimization. *Proceedings of the 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Lyngby, Denmark, pp. 1–5.

[8] Zhao, P., Suryanarayanan, S. y Simões, M. G. (2013) An Energy Management System for Building Structures Using a Multi-Agent Decision-Making Control Methodology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **49**, 322–330.

[9] Téllez Molina, M. B., Gafurov, T. y Prodanović, M. (2011) Proactive control for energy systems in smart buildings. *Proceedings of the 2nd IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Manchester, UK, pp. 1–8.

[10] Malysz, P., Sirouspour, S. y Emadi, A. (2013) MILP-based rolling horizon control for microgrids with battery storage. *Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, Vienna, Austria, pp. 2099–2104.

[11] Atzeni, I., Ordóñez, L. G., Scutari, G., Palomar, D. P. y Fonollosa, J. R. (2013) Noncooperative and Cooperative Optimization of Distributed Energy Generation and Storage in the Demand-Side of the Smart Grid. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **61**, 2454–2472.

[12] Tarasak, P., Chai, C. C., Kwok, Y. S. y Oh, S. W. (2014) Demand Bidding Program and Its Application in Hotel Energy Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5**, 821–828.

[13] Costanzo, G. T., Zhu, G., Anjos, M. F. y Savard, G. (2012) A System Architecture for Autonomous Demand Side Load Management in Smart Buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 2157–2165.

[14] Zhao, Z., Lee, W. C., Shin, Y. y Song, K.-B. (2013) An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **4**, 1391–1400.

[15] Löfberg, J. (2004) YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. *Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*, Taipei, Taiwan, pp. 284–289.

[16] Achterberg, T. (2009) SCIP: Solving constraint integer programs. *Mathematical Programming Computation*, **1**, 1–41.

[17] Currie, J. y Wilson, D. I. (2012) OPTI: Lowering the Barrier Between Open Source Optimizers and the Industrial MATLAB User. *Proceedings of the 2012 Foundations of Computer-Aided Process Operations*, Savannah, GA, pp. 1–6.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE CREACIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN VISUAL DE UN ROBOT MÓVIL

L. Payá, F. Amorós, A. Gil, L. Fernández, O. Reinoso

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
Universidad Miguel Hernández. Avda. de la Universidad s/n. 03202, Elche (Alicante), Spain
lpaya@umh.es, famoros@umh.es

Resumen

En este trabajo se presenta una herramienta software que ha sido desarrollada para su uso en una asignatura de robótica móvil y visión por computador cuyo principal objetivo consiste en el diseño de algoritmos para el control de un robot autónomo. En las aplicaciones que requieren que el robot se mueva a través de un entorno desconocido, es muy importante construir un modelo o mapa de dicho entorno y estimar la posición del robot en el mismo con precisión suficiente. La construcción de mapas y la localización son dos temas en constante desarrollo y día tras día surgen nuevos métodos que tratan de resolverlos, algunos de los cuales pueden resultar matemáticamente muy complejos. Teniendo este hecho en cuenta, hemos diseñado una plataforma que proporciona a los estudiantes las herramientas necesarias para entender los algoritmos y que les permite configurarlos para optimizar los procesos de creación de mapas y localización. Hemos incluido varias bases de datos, compuestas por varios conjuntos de escenas interiores, capturadas en entornos de trabajo reales y bajo las condiciones de iluminación habituales. De este modo, los estudiantes afrontan los problemas que podrían surgir en una aplicación real. En este artículo presentamos los detalles de implementación de la plataforma y las prestaciones que ofrece.

Palabras Clave: Control de robots, software educativo, robots móviles, visión por computador, laboratorio virtual.

1 INTRODUCCIÓN

Cuando un robot móvil debe realizar cierta tarea de forma autónoma en un entorno desconocido, es necesario que lleve a cabo dos pasos fundamentales. El primero consistiría en crear una representación interna del entorno desconocido (mapa) y el segundo sería la estimación de la posición del robot en este entorno. Para alcanzar este objetivo, el robot debe hacer uso de la información suministrada por los sensores con que está equipado y compararla con la información previamente almacenada en el mapa. A menudo, se hace uso de la información capturada por una cámara montada sobre el mismo robot como información de partida para resolver los problemas de creación de mapas y localización. Asimismo, también es habitual trabajar con sistemas catadióptricos que ofrecen imágenes omnidireccionales del entorno de trabajo [1]. Estas cámaras constituyen una buena solución debido a la variedad de la información que proporcionan y su relativamente bajo coste comparado con otros tipos de sensores. Por estas razones, han sido extensamente estudiados durante los últimos años en tareas de control de robots.

Las investigaciones llevadas a cabo en la temática de creación de mapas y localización usando información visual es muy abundante y se han desarrollado numerosos enfoques y algoritmos hasta la fecha. Tanto la visión por computador como la robótica constituyen dos campos de la ingeniería que se encuentran en constante desarrollo [9].

Estos dos temas se estudian en una asignatura de doctorado en la Universidad Miguel Hernández. En esta asignatura, los estudiantes aprenden las principales estrategias que se pueden utilizar para la construcción de mapas y localización, usando como punto de partida la información capturada por un sistema de visión omnidireccional montado sobre el robot. Entre estas estrategias, nos centramos en los métodos basados en la apariencia global. En este enfoque, no se extraen características locales de las escenas para construir el mapa, sino que la información de las mismas se utiliza de forma global y la localización se lleva a cabo mediante la comparación de las escenas completas. Este enfoque ha atraído el interés de los investigadores debido a su simplicidad, robustez y capacidad de trabajar correctamente en entornos visualmente poco estructurados y dinámicos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para resolver el control del robot haciendo uso de este enfoque, se deben implementar dos etapas. Primero, el robot recorre el entorno desconocido y captura algunas imágenes desde ciertas posiciones. Como regla general, se añade una nueva escena cuando la información visual es suficientemente distinta a la escena previamente capturada. Dado que las imágenes son datos de muy alta dimensión, los métodos basados en la apariencia global requieren que se aplique a las escenas algún tipo de compresión que conserve la integridad de las escenas, sin realizar ninguna extracción de características. Con este objetivo, es posible hacer uso de diversas técnicas para crear un descriptor de apariencia global de cada escena. Este conjunto de descriptores compondrá el mapa. En segundo lugar, una vez que el mapa ha sido construido, el robot debe ser capaz de calcular su posición y orientación en el mismo. Para ello, el robot captura una nueva imagen, calcula su descriptor y lo compara con todos los descriptores de la base de datos (mapa). Como resultado, es posible estimar la posición y orientación actuales del robot.

En ocasiones, la complejidad matemática inherente a los algoritmos provoca que los estudiantes se pierdan en el aparato matemático y no lleguen a profundizar en su aplicación. En este sentido, las prácticas son una parte fundamental de la asignatura dado que permiten que los estudiantes adquieran la habilidad de resolver problemas reales haciendo uso de equipamiento real. Sin embargo, el número de equipos disponibles en el laboratorio es limitado y varios estudiantes tienen que compartirlo, lo cual provoca que cada uno no pueda avanzar al ritmo que requiera y además, el laboratorio no está siempre disponible para que puedan practicar lo que están estudiando. Estas son las razones por las que hemos implementado y desarrollado esta herramienta software. Podemos encontrar algunos laboratorios virtuales de robótica en trabajos como [3], [4] y [8].

En la herramienta software que presentamos, hemos incluido varias bases de datos de imágenes capturadas en varios entornos interiores bajo condiciones de iluminación realistas, con las que los estudiantes podrán validar los algoritmos de creación de mapas y localización. Hemos incluido algunas de las técnicas más habituales para la descripción de la apariencia global de imágenes panorámicas: métodos basados en la DFT (Transformada Discreta de Fourier), PCA (Análisis de Componentes Principales), HOG (histogramas de orientación del gradiente) y *gist* (esencia) de la escena. De este modo, el estudiante podrá testarlos y comparar bajo qué situaciones funciona mejor cada uno de los métodos y cómo se deben ajustar los parámetros necesarios para optimizar su comportamiento. Asimismo, hemos incluido algunas escenas intermedias que incluyen ruido, rotaciones y oclusiones parciales, que permitirán probar el proceso de localización. La herramienta es totalmente interactiva y tanto el proceso de creación del mapa como de localización son totalmente configurables. En todo caso, los resultados se muestran gráficamente para que los estudiantes puedan realizar estudios comparativos. El resto del artículo se estructura como sigue; la sección 2 presenta los métodos de descripción de la apariencia visual de escenas. En la sección 3 describimos la herramienta software, cómo se utiliza y sus principales características y, para concluir, la sección 4 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2 MÉTODOS DE DESCRIPCIÓN DE LA APARIENCIA GLOBAL DE ESCENAS. CREACIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN

Para capturar la base de datos que hemos incluido en la herramienta, hemos trabajado con un robot Pioneer P3-AT, equipado con un sistema catadióptrico consistente en una cámara convencional y un espejo parabólico que proporciona imágenes omnidireccionales del entorno. Para trabajar con esta información de una manera eficiente, transformamos las imágenes omnidireccionales a un formato panorámico con un tamaño de 64x256 píxeles. La figura 1 muestra (a) el robot, (b) la cámara y el espejo y (c) un ejemplo de imagen omnidireccional y su conversión a formato panorámico.

Para construir las bases de datos, hemos capturado un conjunto de imágenes omnidireccionales sobre una rejilla predefinida de 40x40 cm en varios entornos de interior. La figura 2 muestra una vista en planta de la rejilla usada para capturar las escenas (puntos azules).

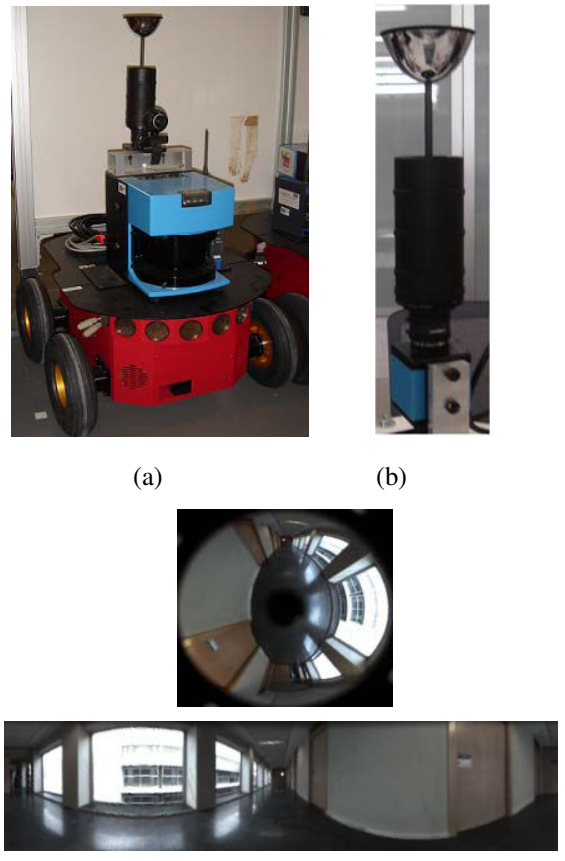
El enfoque de apariencia global implica almacenar la información visual en el mapa sin extraer ningún tipo de característica local, mientras que la localización se lleva a cabo comparando esta información global. Si estos procesos se realizaran directamente, con imágenes de alta resolución, el coste computacional sería demasiado elevado en entornos grandes, de modo que la creación de mapas y localización no se podría llevar a cabo en tiempo real. Por este motivo, estudiamos a continuación varios métodos que permiten extraer la información más relevante de cada escena de forma global.

2.1 TÉCNICAS BASADAS EN LA DFT

La técnica que hemos implementado está basada en la firma presentada en [6]. Esta Firma de Fourier presenta dos propiedades interesantes: la información

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

más relevante se concentra en los componentes de baja frecuencia de cada fila (efecto de compresión) y presenta invariancia rotacional. El método consiste en convertir cada fila de la imagen panorámica usando la DFT. Tras este proceso, cada imagen se representa mediante una matriz de tamaño $m \times k_1$, donde m es el número de filas de la imagen panorámica y k_1 el número de componentes de Fourier que retenemos para construir el descriptor. Se trata de una matriz de números complejos que a su vez dará lugar a una matriz de módulos y una matriz de argumentos. k_1 es un parámetro configurable. Un valor alto de k_1 indica que retenemos más información de las escenas pero esto supone un coste computacional más elevado. Asimismo, los términos de mayor frecuencia se espera que estén más influenciados por el posible ruido presente en la escena.



(a) (b)

(c)

Figura 1: (a) Robot Pioneer P3-AT, (b) sistema catadióptrico y (c) imagen omnidireccional capturada con el sistema y transformación a panorámica.

Para calcular la posición y orientación que tenía el robot en el momento de capturar una imagen de test, calculamos la Firma de Fourier de dicha imagen y entonces obtenemos la distancia Euclídea entre su matriz de módulos y las matrices de módulos de las escenas almacenadas en el mapa. Tomaremos el vecino más cercano como la posición actual del robot. Por su parte, para calcular la orientación del robot haremos uso de la matriz de argumentos y del teorema del desplazamiento de la transformada de Fourier [6]. El número de componentes por fila utilizado para calcular la orientación, k_2, también es un parámetro configurable.

2.2 TÉCNICAS BASADAS EN PCA

El Análisis de Componentes Principales (PCA) [5] nos permite representar un conjunto de imágenes en un nuevo subespacio donde cada imagen se convierte en un vector de características de dimensión k_3, donde k_3 es un parámetro configurable que representa los componentes PCA que preservan la mayor parte de la varianza del conjunto original de escenas. PCA presenta un buen ratio de compresión. Sin embargo, los vectores de características resultantes no presentan invariancia rotacional. Para resolver este problema, hemos implementado un algoritmo que aplica PCA sobre la Firma de Fourier de la escena, de modo que se ejerce un doble efecto de compresión y las características resultantes presentan invariancia rotacional. El mapa PCA está compuesto por la matriz $V \in R^{k_3 xM}$, que contiene los k_3 autovectores principales (M es el número de píxeles de la imagen) y las proyecciones de las imágenes de entrenamiento $\vec{p}^{\,j} \in R^{k_3 x1}$; $j = 1 \ldots N$ (N es el número de imágenes en el mapa).

Para calcular la localización desde la que el robot ha capturado una imagen de test, debemos proyectar la imagen de test en el nuevo espacio. Una vez que disponemos de la proyección $\vec{p}^{\,i} \in R^{k_3 x1}$, debemos compararla con todos los vectores de características almacenados en el mapa $\vec{p}^{\,j}$. El criterio utilizado es la distancia Euclídea. La imagen del mapa que presenta un mínimo valor de distancia (ecuación (1)) es la imagen correspondiente.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{l=0}^{k_3} \left(p^{il} - p^{jl}\right)^2}; \quad j = 1 \ldots N \qquad (1)$$

2.3 TÉCNICAS BASADAS EN HOG

Los descriptores HOG están basados en la orientación del gradiente en regiones de una imagen. La imagen se divide en un número determinado de celdas y se representa cada celda por medio de un histograma de orientación. Al ordenar estos histogramas en un único vector obtendremos el descriptor de la escena [2].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuando un robot toma varias imágenes desde una única posición con diferentes orientaciones, las imágenes panorámicas resultantes contienen los mismo píxeles en cada una de sus filas, cambiando únicamente el orden. Teniendo este hecho en cuenta, para conseguir un descriptor de localización (que sea invariante ante cambios de orientación) tomamos celdas horizontales sobre la imagen (con un ancho igual al número de columnas de la imagen). El número de celdas horizontales será un parámetro configurable. Por su parte, para conocer la orientación relativa entre dos imágenes rotadas, construiremos un segundo descriptor tomando celdas verticales sobre la imagen. El número y el ancho de estas celdas será un parámetro configurable, con objeto de conseguir una buena resolución en la estimación del ángulo.

Cuando el robot captura una nueva imagen de test, primero se calcula su histograma de orientación del gradiente usando tanto celdas horizontales como celdas verticales. Para calcular la posición del robot, en primer lugar, se usa la información de las celdas horizontales. A continuación, para encontrar la orientación se hace uso de la información de las celdas verticales. En ambos casos, se usará la distancia Euclídea como criterio de comparación entre los descriptores de la imagen de test y los almacenados en el mapa. El coste computacional del proceso dependerá del número y tamaño de ambos tipos de celdas.

2.4 TÉCNICAS BASADAS EN *GIST*

Los descriptores basados en *gist* (esencia en inglés) tratan de extraer la información esencial de la imagen tratando de imitar la habilidad del sistema de percepción humano para reconocer una escena, identificando la forma o color de estructuras que destacan y evitando representar objetos o características locales, [7], [10]. El descriptor que hemos implementado en la plataforma está basado en el filtrado de Gabor y proporciona información acerca de frecuencia y orientación. Cada escena es filtrada usando un banco de filtros de Gabor con diferentes resoluciones y orientaciones. La escena se divide en celdas, usando los mismos principios que el subapartado anterior y se calcula el valor medio de los píxeles de cada celda. Con toda esta información se compone un vector de características de localización y uno de orientación para cada una de las escenas.

La localización se estima calculando la distancia mínima entre el descriptor de posición de la imagen de test y los descriptores de posición contenidos en el mapa.

Para finalizar, la tabla 1 muestra los parámetros que el usuario de la plataforma puede configurar durante el proceso de creación de mapas y localización para cada uno de los métodos implementados.

Tabla 1: Parámetros configurables en cada método de descripción.

Método	Páram	Descripción
1. DFT	k_1	Núm. comp. módulo
	k_2	Núm. comp. fase
2. PCA	k_1	Núm. comp. módulo Fourier
	k_3	Núm. comp. PCA
	k_2	Num. comp. fase Fourier
3. HOG	k_4	Núm. celdas horizontales
	k_5	Núm. celdas verticales
	k_6	Ancho celdas verticales
4. *gist*	k_7	Núm. máscaras Gabor (escala 1)
	k_8	Núm. máscaras Gabor (escala 2)
	k_9	Núm. celdas horizontales
	k_{10}	Núm. celdas verticales
	k_{11}	Ancho celdas verticales

3 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

La interfaz gráfica de usuario ha sido creada mediante la herramienta GUIDE de Matlab. En esta sección presentamos un descripción detallada de las operaciones que están disponibles a través de la interfaz. Nuestro objetivo fundamental era proporcionar a los estudiantes una herramienta que les permitiera comprender el funcionamiento de los descriptores de apariencia global y su aplicación a la creación de mapas y localización de un robot móvil. Todos los parámetros de las técnicas implementadas son configurables por el usuario. Asimismo, la distribución de imágenes en el mapa, la posición de las imágenes test y la distancia desde la imagen test a las imágenes del mapa son representadas gráficamente. También se incluye información sobre el coste computacional tanto del proceso de construcción del mapa como del de localización. Por último, el estudiante también podrá llevar a cabo comparaciones entre las diferentes técnicas y bajo situaciones cambiantes como ruido y oclusiones parciales.

La figura 2 muestra la primera parte de la interfaz gráfica durante un experimento. Con esta parte de la interfaz, el estudiante puede experimentar con el proceso de construcción del mapa. Es posible seleccionar el método de descripción deseado y ajustar sus parámetros. Por su parte, la figura 3 muestra la segunda parte de la interfaz gráfica, en la que el estudiante puede llevar a cabo experimentos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

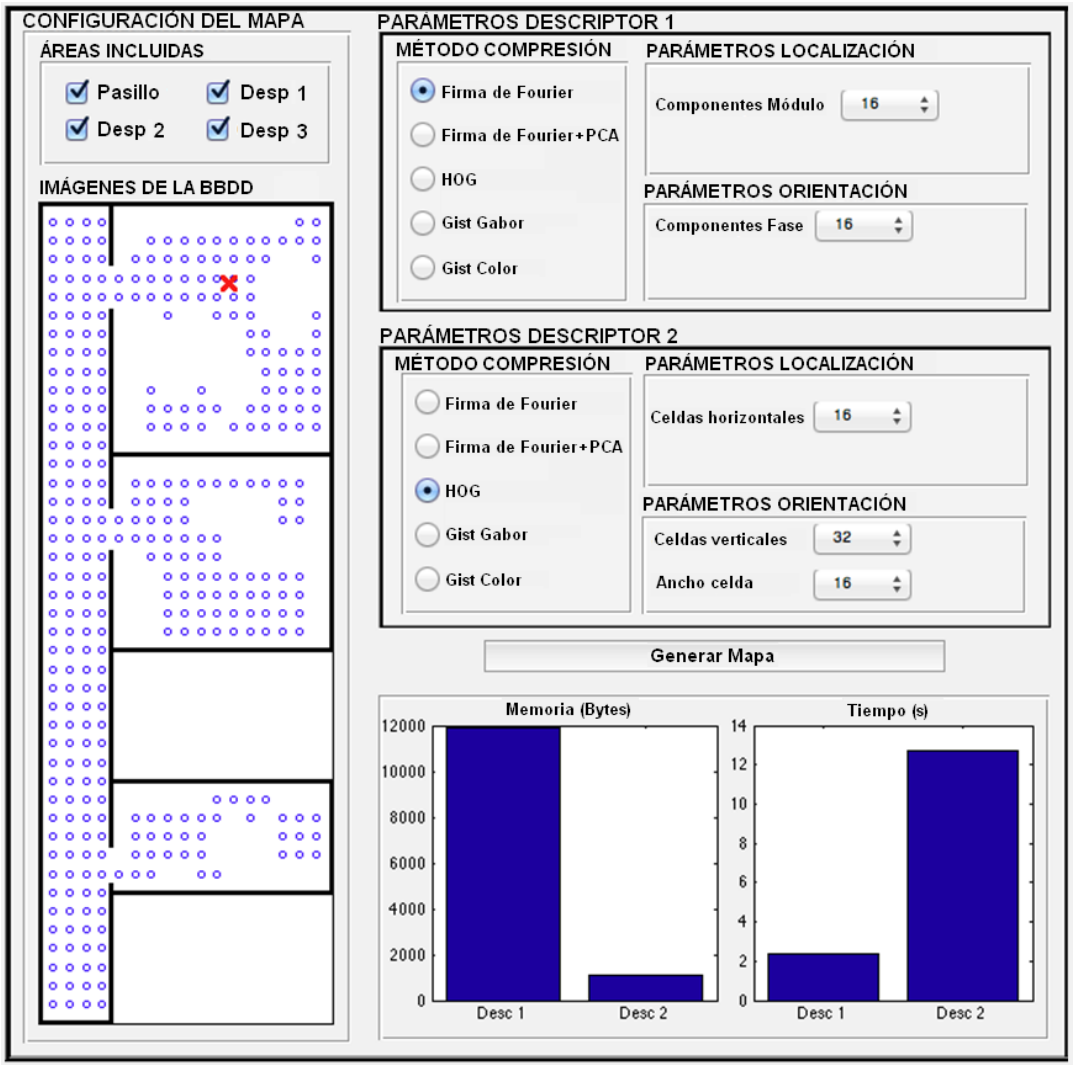


Figura 2: Apariencia de la interfaz gráfica de la aplicación durante un experimento. Parte 1: creación del mapa.

de localización con los mapas previamente creados. El manejo de ambas interfaces es muy intuitivo, y se guía al alumno a través del proceso de construcción del mapa y localización. Además, la interfaz proporciona todos los resultados necesarios para que el alumno pueda analizar cuál es el mejor descriptor tanto en términos de coste computacional y necesidades de memoria como en cuanto a la precisión de los resultados de localización.

3.1 EXPERIMENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MAPA

En primer lugar, el estudiante debe crear el mapa. La base de datos mostrada en la parte izquierda de la figura 2 está compuesta por 363 imágenes panorámicas en color distribuidas sobre una rejilla de tamaño 40 x 40 cm a lo largo de 4 estancias diferentes. Para construir el mapa, el estudiante debe elegir la técnica de compresión a aplicar y debe configurar los parámetros de dicha técnica. Existen 5 posibilidades. A modo de ejemplo, la figura 2 muestra los parámetros correspondientes a la Firma de Fourier y al descriptor HOG. Es posible elegir el valor de cada parámetro mediante menús emergentes. Si algún parámetro no se cambia, la aplicación tomará el valor por defecto que aparece en un principio.

Tras seleccionar los parámetros deseados, el estudiante podrá generar el mapa. Una vez concluido este proceso, se mostrará un gráfico que incluye información sobre el tiempo que ha sido necesario para crear el mapa (construir el descriptor de cada imagen de entrenamiento) y la memoria que se requiere para almacenar toda esta información. Con la interfaz gráfica mostrada, el estudiante puede decidir qué estancias quiere incluir en el mapa y además, puede llevar a cabo una comparativa de dos métodos de descripción en cuanto a coste computacional y memoria necesaria.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

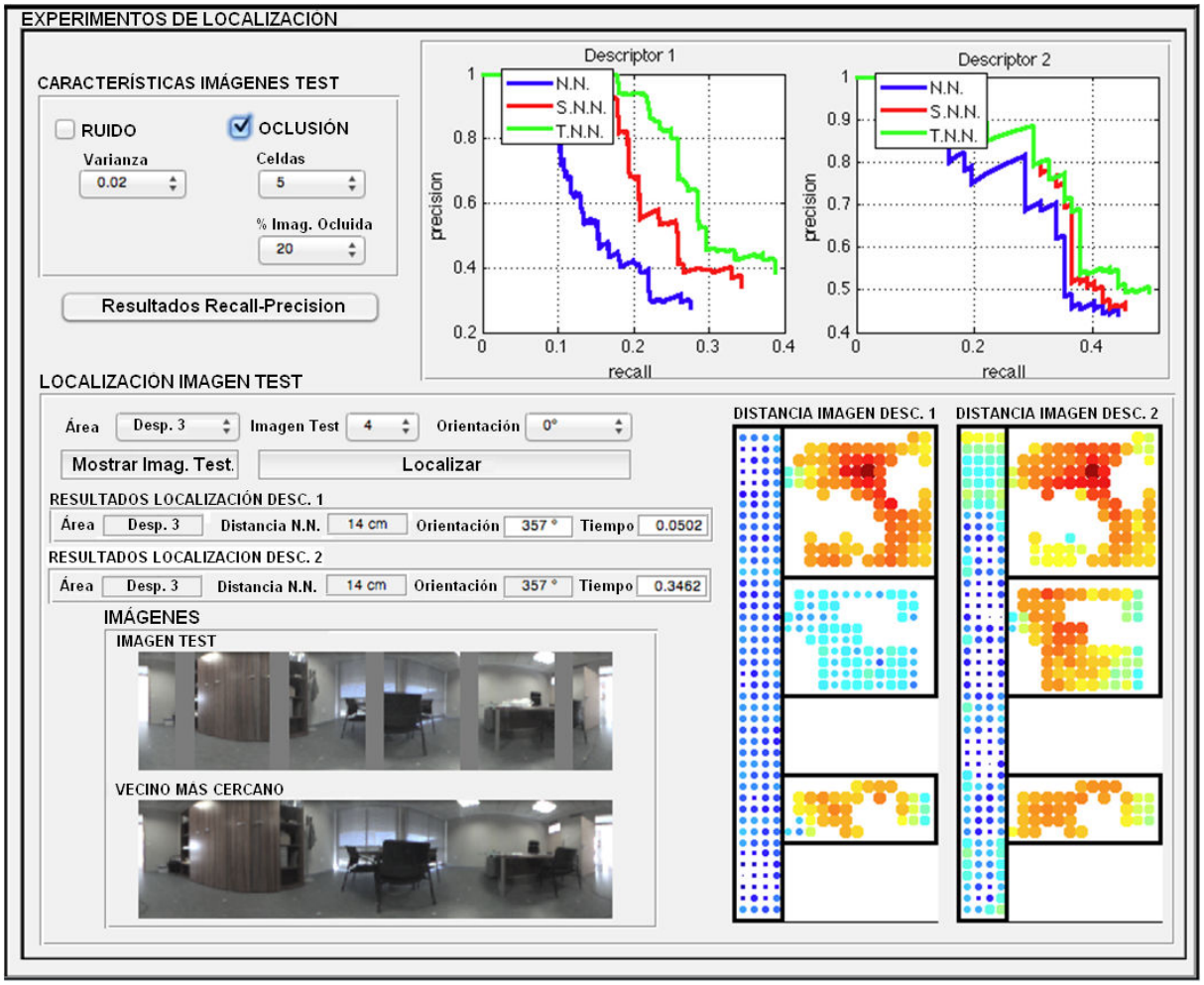


Figura 3: Apariencia de la interfaz gráfica de la aplicación durante un experimento. Parte 2: localización del robot.

3.2 EXPERIMENTO DE LOCALIZACIÓN DEL ROBOT

Una vez construido el mapa, la segunda etapa en la experimentación consistiría en estudiar su utilidad para que el robot sea capaz de estimar su posición y orientación. Para llevar a cabo este experimento, hemos incluido en la herramienta varios conjuntos de imágenes de test. Estas imágenes han sido capturadas en puntos intermedios entre las imágenes del mapa. El objetivo consiste en estimar la posición que tenía el robot cuando capturó estas imágenes de test haciendo uso únicamente de la información visual, comparando la imagen de test con la información contenida en el mapa. El método de compresión y los parámetros que se utilizan serán los mismos que en la fase de construcción del mapa. El botón 'Localiza' se encuentra deshabilitado hasta que el mapa haya sido creado con éxito. Con la interfaz, el estudiante puede comprobar el coste computacional y la precisión de cada descriptor de apariencia global, en función del valor de sus parámetros.

El conjunto de imágenes de test está compuesto por 9 posiciones por área, con 16 orientaciones distintas por posición (cada 22.5º), con un total de 546 imágenes de test. En la interfaz, el estudiante puede seleccionar el área, el número de imagen de test con la que trabajar y su orientación. Además, es posible añadir ruido y/u oclusiones a las imágenes de test, fenómenos habituales que se suelen producir en aplicaciones reales de localización de robots móviles. Gracias a estas características, el experimento puede reproducir algunas situaciones típicas que ocurren en una aplicación real de navegación de un robot móvil por un entorno en el que hay personas u otros robots moviéndose (figuras 4 y 5).

Cuando el estudiante pulsa el botón 'Mostrar Imagen Test', la aplicación lee dicha imagen y su posición en el mapa, y esta posición aparece en la vista en planta

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

del mapa, marcada como una x roja. La imagen de test aparece en la parte inferior izquierda.

Al fin, cuando el estudiante pulsa el botón 'Localiza', la aplicación calcula el descriptor de la imagen de test y calcula la distancia Euclídea entre este descriptor y todos los descriptores del mapa. La imagen más cercana es considerada como la posición correspondiente del robot. A continuación, la aplicación estima la orientación del robot, calculando el desfase relativo entre el descriptor de la imagen de test y el descriptor del vecino más cercano (N.N, *Nearest Neighbor*, en la interfaz). Una vez estimadas la posición y orientación, los paneles 'Resultados de localización' (figura 3), indican el área en la que se encuentra el vecino más cercano, la distancia geométrica entre la imagen de test y dicho vecino y la orientación estimada. Además, la interfaz muestra el tiempo que ha sido necesario para llevar a cabo todo este proceso. Este es un factor especialmente interesante, puesto que permite saber si el descriptor en cuestión podría ser usado en una aplicación de navegación en tiempo real. Bajo la imagen de test, incluimos la imagen panorámica del vecino más cercano, en la parte inferior izquierda de la ventana. De este modo, la interfaz facilita la comparación entre ambas imágenes para apreciar si el proceso de localización y orientación ha sido correcto o no.

En la parte inferior derecha de la figura 3, la aplicación dibuja la distancia imagen entre el descriptor de la imagen de test y cada uno de los descriptores del mapa. En cada una de las posiciones del mapa se muestra un círculo, cuyo color y tamaño representan la similitud entre descriptores. Círculos rojos y grandes indican alta similitud mientras que círculos pequeños y azules corresponden a escenas con menor similitud. El estudiante puede apreciar entonces si hay algún mínimo local en el mapa que podría dar lugar a áreas de confusión (debido al fenómeno de *aliasing visual* que ocurre comúnmente en entornos de interior en que las estructuras visuales tienden a repetirse y zonas alejadas pueden presentar una apariencia visual muy semejante, produciendo confusión en el proceso de localización del robot). Por último, en la parte superior derecha, la aplicación muestra una gráfica *recall-precisión*, que se calcula tomando en consideración todas las imágenes test disponibles en la plataforma. Esta gráfica es una buena forma de resumir el comportamiento del descriptor analizado.

Cuando se selecciona un método de descripción diferente, o cuando se cambia cualquiera de los parámetros, todos los resultados de la fase de localización desaparecen y el botón 'Localizar' vuelve a presentarse deshabilitado hasta que el mapa sea generado de nuevo.

Para finalizar, tal y como se muestra en la figura 3, la interfaz también ofrece al estudiante la posibilidad de comparar el desempeño de dos métodos de descripción. El estudiante puede llevar a cabo una comparación entre dos descriptores distintos o estudiar cómo el comportamiento de un mismo descriptor cambia si varía el valor de alguno de sus parámetros.

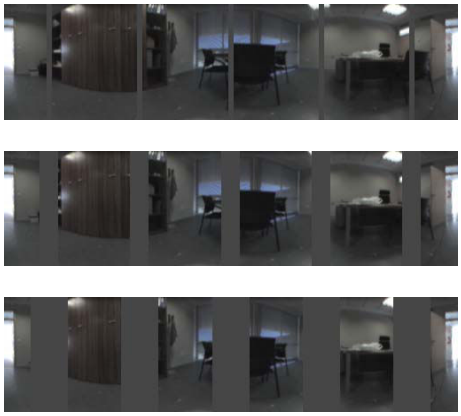


Figura 4: Ejemplos de imágenes de test con diferente porcentaje de oclusión.

Figura 5: Ejemplos de imágenes de test con ruido añadido de diferentes varianzas.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado una herramienta software educativa para el aprendizaje de algoritmos de creación de mapas y localización de robots móviles. Estos algoritmos constituyen dos pasos cruciales durante el control de un robot móvil autónomo. La herramienta ha sido diseñada para ser usada en una asignatura de doctorado que trata sobre visión por computador aplicada al control de robots móviles.

Gracias a esta herramienta, los estudiantes pueden poner en práctica los algoritmos estudiados en el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

aula. Las sesiones prácticas propuestas permiten a los estudiantes tener una visión global de la asignatura y entender sus aplicaciones reales. La plataforma presenta varias ventajas tanto para el estudiante como para el profesor. El estudiante puede probar todos los algoritmos a través de una interfaz gráfica intuitiva y puede llevar a cabo los experimentaos en cualquier momento, siguiendo el ritmo de aprendizaje que el/ella crea necesario, sin ninguna restricción horaria. El sistema potencia la autonomía del estudiante y permite un sistema de evaluación justo. Desde el punto de vista de los profesores, el grado de seguimiento de la asignatura ha mejorado y, gracias a la herramienta, los estudiantes son capaces de diseñar algoritmos más sofisticados para controlar los movimientos de un robot móvil y ajustar correctamente el valor de los parámetros necesarios.

En la actualidad estamos trabajando en la mejora de esta herramienta desde varios puntos de vista. En primer lugar, pretendemos incluir nuevos métodos de creación de mapas y localización, para que sea una herramienta más completa. También nos gustaría integrar esta herramienta con un laboratorio remoto, de modo que los estudiantes pudieran teleoperar el robot real a través de Internet, capturar sus propios mapas e imágenes de test e incluso desarrollar un algoritmo de localización probabilística, afrontando los problemas que pueden surgir en una aplicación real.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2010-15308, 'Exploración integrada de entornos mediante robots cooperativos para la creación de mapas 3D visuales y topológicos que puedan ser usados en navegación con 6 grados de libertad'.

Referencias

[1] Amorós, F., Paya, L., Reinoso O., Fernández, L., and Marin, J. M. (2010). "Visual Map Building and Localization with an Appearance-based Approach", *Proc. of 7th Int. Conf. on Informatics, in Control, Automation and Robotics, ICINCO 2010*. 2, pp. 423 – 426

[2] Dalal, N. and Triggs, B. (2005). "Histograms of oriented gradients for human detection", *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, USA.

[3] de Queiroz, L.R.; Bergerman, M.; Campos Machado, R.; Bueno, S.S.; Elfes, A. (1998). "A robotics and computer vision virtual laboratory", *Advanced Motion Control, 1998. AMC '98-Coimbra.*

[4] Jara, C., Candelas, F., Puente, F., Torres, F. (2011). "Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory", *Computers & Education*, 57(4).

[5] Krose, B., Bunschoten, R., Hagen, S., Terwijn, B., and Vlassis, N. (2004). "Household robots look and learn: environment modelling and localization from an omnidirectional vision system", *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 11(4), pp. 45 – 52.

[6] Menegatti, E., Maeda, T., and Ishiguro, H. (2004). "Image based memory for robot navigation using properties of omnidirectional images", *Robotics and Autonomous Systems*. 47(4), pp. 251 – 276

[7] Oliva, A. and Torralba, A. (2001). "Modelling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope", *Int. Journal of Computer Vision*, 42(3), pp. 145 – 175

[8] Ramasundaram, V., Grunwald, S., Mangeot, A., Comerford, N.B., Bliss, C.M. (2005). "Development of an environmental virtual field laboratory", *Computers & Education*, 45(1).

[9] Siegwart, R., and Nourbakhsh, I.R. (2004). Introduction to autonomous mobile robots. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

[10] Torralba, A. (2003). "Contextual priming for object detection", *Int. Journal of Computer Vision*, 53(2), pp. 169 – 191

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CPWalker - Plataforma robótica para la rehabilitación y el entrenamiento de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral

R.Raya, O. Ramírez, M.D. del Castillo, J. I. Serrano, A. Iglesias, R. Ceres, E. Rocon
CAR-CSIC, Crta. Campo Real Km 0.200 Arganda del Rey (Madrid)

F. Mollá, J.M. Belda, R. Poveda, A. López
Instituto de Biomecánica de Valencia, IBV, Camino de Vera s/n, Valencia

I. Martínez, S. Lerma, T. Martín
Hospital Universitario Infantil Niño Jesús, Menéndez Pelayo, 65, Madrid

Resumen

Este artículo presenta una plataforma robótica para la rehabilitación post-quirúrgica de personas con parálisis cerebral (PC). La PC define un conjunto de trastornos de la postura y el movimiento que aparece debido a una lesión en el cerebro inmaduro. La cirugía ortopédica es el mejor tratamiento cuando existen problemas musculoesquéleticos severos. La plataforma CPWalker combina un andador inteligente y un exoesqueleto con interfaces avanzados (BCI, EMG) para la interacción humano-robot. En este trabajo se describe tanto el diseño conceptual como el desarrollo de la plataforma CPWalker.

Palabras Clave: Parálisis cerebral, robótica, rehabilitación, interfaces hombre máquina.

1 INTRODUCCIÓN

La parálisis cerebral (PC) es un trastorno de la postura y el movimiento debido a una lesión en el cerebro inmaduro, [1]. La PC afecta a entre 2 y 3 recién nacidos por 1000, según el registro europeo de 'Surveillance of Cerebral Palsy European Network (SCPE)', [2], con una prevalencia de entre 3 y 4 por 1000 entre niños en edad escolar en EEUU, [3]. La PC es la causa más frecuente de discapacidad física severa y permanente en la infancia. A pesar de los avances en la prevención y tratamiento en el embarazo, en el parto y en las primeras fases de vida, las cifras de personas afectadas han aumentado ligeramente. Esto último es debido, fundamentalmente, al aumento de la supervivencia de bebés prematuros en situación crítica, consecuencia de una sustancial mejora en los tratamientos y cuidados recibidos, [4].

Existe un elevado número de niños con PC que presenta patrones patológicos al caminar, acentuándose al crecer y aumentar su peso. Los tratamientos para personas con PC dependen específicamente de la patología de la persona, pudiendo variar desde medicación hasta cirugía.

En algunos casos, el desarrollo de una patología musculoesquelética contribuye a una pérdida de funcionalidad, como problemas en la marcha, fatiga, reducción de la actividad o restricciones en la participación. La cirugía ortopédica es el mejor tratamiento en PC cuando existen problemas musculoesquéleticos severos y mediante la cual se minimiza la pérdida de funcionalidad mencionada, [5]. Una de las principales técnicas es la cirugía ortopédica multinivel, que implica que en la intervención tienen lugar al menos dos procedimientos ortopédicos (tejidos blandos y/o huesos) en diferentes puntos anatómicos y en ambas extremidades inferiores en un único procedimiento quirúrgico, [6]. El objetivo de estas intervenciones es corregir las deformidades existentes y mejorar la marcha de los niños con PC. Esta intervención recibe el nombre de Cirugía multinivel de único evento (SEMLS, en nomenclatura anglosajona) cuando se realiza en un paciente que no ha sido intervenido previamente.

El principal objetivo de CPWalker es desarrollar y validar una plataforma robótica que sirva de apoyo a las terapias de rehabilitación post-quirúrgica SEMLS y reduzca el tiempo de rehabilitación. Este objetivo será alcanzado mediante el desarrollo de una plataforma robótica (andador inteligente + exoesqueleto + neuroprótesis) controlada por una interfaz multimodal que sirva de canal de comunicación entre la persona con PC y la terapia de rehabilitación.

2 EL SISTEMA CPWALKER

La Figura 1 muestra el diseño conceptual del sistema CPWalker. En esta sección abordamos sus principales componentes y su función.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

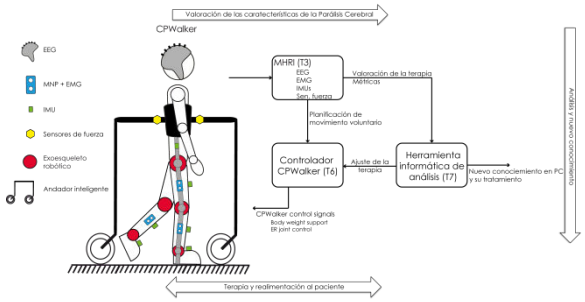


Figura 1: Diseño conceptual del sistema CPWalker

2.1 ANDADOR INTELIGENTE + EXOESKELETO

El sistema está construido sobre el dispositivo NFWalker de la compañía Made For Movement, que colabora en el proyecto (Figura 2). Al dispositivo original se le ha dotado de actuación en la tracción y en el soporte del peso del paciente (Figura 3). Con ello se consigue que el apoyo que recibe el paciente durante las fases de la marcha sea regulable y las fases de rehabilitación puedan ajustarse al nivel funcional del paciente.

Figura 2: Sistema NFWalker de la compañía Made For Movement

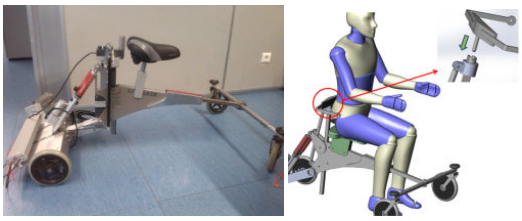


Figura 3. Adaptaciones del sistema NFWalker para actuación sobre la tracción y el soporte del peso

Además de la posibilidad de actuar sobre la tracción y el peso, es posible actuar sobre las articulaciones de la extremidad. Para ello, se ha dotado al exoesqueleto del sistema NFWalker de actuadores que guiarán el recorrido articular del paciente.

Figura 3: Sistema de actuación sobre las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo

2.2 INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT

La interacción entre el paciente y la plataforma robótica se realiza a través de una interfaz multimodal Humano-Robot (MHRI, en nomenclatura anglosajona) compuesta de: (1) una unidad de análisis electroencefalográfico (EEG), (2) una unidad inercial (IMU), (3) un sistema electromiográfico (EMG) inalámbrico, y (4) sensores de fuerza. La razón para la integración de esta interfaz multimodal es integrar el sistema nervioso periférico (SNP) y el sistema nervioso central (SNC) en la estrategia de rehabilitación. La integración del MHRI permite, junto a la implementación de programas de rehabilitación específicos, integrar la planificación voluntaria del usuario en la terapia, promoviendo la reorganización cerebral y, por tanto, integrando el SNC en la terapia.

Actualmente el sistema puede funcionar en modo "Causa-Efecto" tomando como comando de actuación la señal cerebral. La relación entre el pensamiento de una acción y que esta acción se ejecute (movimiento del robot), refuerza los canales de comunicación entre el SNP y SNC (facilitación asociativa) con lo que el impacto de la rehabilitación es mayor.

La Figura 4 muestra una fotografía de un paciente realizando una experimentación en el Hospital Niño Jesús. En ella se trabaja con un entorno virtual donde el usuario puede controlar, mediante actividad cerebral, cuando un avatar empieza a caminar.

Figura 4: Paciente durante pruebas de EEG realizadas en el Hospital Niño Jesús

Además de la señal EEG, el sistema puede ser puesto en marcha con la actividad muscular mediante un

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dispositivo electromiográfico (EMG) o mediante el movimiento de alguna extremidad, empleando unidades de medida inercial (IMU).

2.3 LA ARQUITECTURA DE CONTROL

El sistema CPWalker cuenta con la arquitectura de control necesaria para gestionar actuadores y sensores en tiempo real siguiendo la configuración del escenario de rehabilitación configurado por el personal clínico.
La gestión de los actuadores incluye el control de los 3 motores de cada extremidad (cadera, rodilla y tobillo), el soporte del peso y la tracción del andador.
La gestión de los sensores incluye la medida del rango articular de cada extremidad (potenciómetro situado en cada articulación), *encoders* de tracción alojados en los motores de tracción y una galga para medir el peso del paciente descargado a través de la estructura del andador.
Todo ello se realiza en tiempo real mediante un PC-104 y un bus CAN que recibe toda la información de control y de medida. La Figura 5 muestra la configuración de la arquitectura de control descrita.

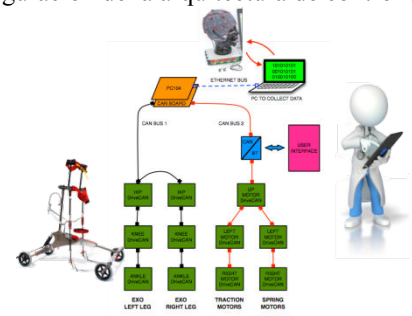


Figura 5. Arquitectura de control del CPWalker

3 ESCENARIOS DE REHABILITACIÓN

El sistema CPWalker ha sido diseñado de forma versátil con el fin de que puedan configurarse diferentes escenarios de rehabilitación. En una primera fase, se ha creado un entorno virtual para entrenar al paciente en las relaciones "Causa-Efecto" (Figura 6).

Figura 6. Escenario virtual de rehabilitación

En este entrenamiento el paciente viste un casco de electrodos, que miden la actividad electroencefalográfica (EEG) y detectan la intención de movimiento, y unas gafas de realidad virtual que consiguen la inmersión total del paciente en el entorno. Una vez detectada la intención de movimiento, un avatar en primera persona comienza el movimiento en el entorno virtual. Esta relación simple de "Causa-Efecto" facilita la asociación de los canales del SNP y SNC. Este entrenamiento tiene lugar en la fase aguda, es decir, inmediatamente después de la intervención quirúrgica. Por ello, el usuario practica sentado y entrena para que, en una fase posterior, pueda comandar el sistema CPWalker tal y como hizo con el avatar virtual.
Además de este entrenamiento, se han planteado otros escenarios una vez el paciente pueda vestir el exoesqueleto. Por ejemplo, se plantea la activación de la marcha con una contracción muscular o la conducción de la dirección con los movimientos de cabeza para la facilitación de la postura erguida de tronco y cabeza.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este artículo ha presentado una plataforma robótica para la rehabilitación de la marcha en personas con parálisis cerebral tras una operación quirúrgica multinivel.
El sistema ha sido construido sobre la plataforma comercial NFWalker, dotando al diseño original de la posibilidad de actuar sobre la tracción, el soporte del peso del paciente y el guiado articular de tronco, rodilla y tobillo. Todo ello configura un sistema muy versátil que permite implementar diferentes programas de rehabilitación adaptados a los distintos niveles funcionales del paciente.
Para facilitar la interacción humano-robot se han previsto distintas posibilidades entre las que destaca el sistema BCI (Brain Computer Interface) que permite accionar el andador con las señales cerebrales. Adicionalmente, se emplean otros sensores electrofisiológicos como el EMG para medir la actividad muscular o los sensores inerciales para la medida del movimiento y la postura del paciente.
En la fase siguiente se realizarán las pruebas de usabilidad en el Hospital Niño Jesús de la plataforma completa y de cada uno de sus componentes.
En definitiva se espera que está plataforma acelere el progreso rehabilitador y aumente la implicación del paciente a través de escenarios más motivadores y complementarios al tratamiento tradicional.

Agradecimientos
Los autores desean expresar su agradecimiento a los usuarios que participan en la evaluación de la plataforma y al organismo financiador del proyecto CPWalker, Plan Nacional Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Bax M, Goldstein M, Rosenbaum P, Leviton A, Paneth N, Dan B, et al. Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005. Dev Med Child Neurol. Aug 2005; 47(8):571-6.

[2]Johnson, A. Prevalence and characteristics of children with cerebral palsy in Europe. *Developmental Medicine and Child Neurology* 2002, *44,9,* 633.

[3] Winter, S.; Autry, A.; Yeargin-Allsopp, M. Trends in the prevalence of cerebral palsy in a population-based study. *Pediatric* 2002, *110, 6,* 1220–1225.

[4] Blair E. Epidemiology of the Cerebral Palsies. Orthop Clin N Am 2010; 41: 441–455.

[5] Bache C, Selber P, Graham HK. The management of spastic diplegia. Cur Orthop 2003; 17: 88-104.

[6] McGinley MJ, Dobson F, Ganeshalingam R, Shores BJ, Rutz E, Graham HK. Single-event multilevel surgery for children with cerebral palsy: a systematic review. Developmental Medicine & Child Neurology, 2011.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control Supervisor para el Control De Sistemas de Fabricación Reconfigurables

Francisco Javier Lastra Santos
c/ Gamazo 1, E.T.S. de Náutica 39004 Santander, lastrafj@unican.es

Jesús Ángel Trujillo Medina
Avda. Fuencarral 44, ed. Campus Empresarial 280108 Alcobendas, jesus.trujillo@iberalter.es

Elías Revestido Herrero
c/ Gamazo 1, E.T.S. de Náutica 39004 Santander, revestidoe@unican.es

José Ramón Llata García
c/ Avda. Los Castros s/n Edificio ETSIIT Dpto. TEISA Santander, ramon.llata@unican.es

Francisco Jesús Velasco González
c/ Gamazo 1, E.T.S. de Náutica 39004 Santander, velascof@unican.es

Resumen

Las grandes fluctuaciones en el mercado producen perturbaciones importantes en los sistemas de fabricación actuales, esto a su vez produce elevados desajustes en sus planes de fabricación. Para responder a estas exigencias se hace necesario que los sistemas de control sean capaces de responder con agilidad frente a esas fluctuaciones y además contengan procesos capaces de adaptar y reconfigurar las operaciones en los procesos productivos. Haciendo posible la implantación de nuevos productos bajo condiciones de mínimos costes, así como la reducción del time-to-market.
Esta variabilidad imposibilita un flujo estable de los productos en las cadenas productivas. A menudo provoca la aparición fenómenos adversos como son los bloqueos (Deadlocks) y cuellos de botella (Bottleneck). Ambos fenómenos reducen enormemente la capacidad productiva de las líneas. Para tratar de paliar estos fenómenos, se requiere de herramientas no solo capaces de detectar dichos fenómenos sino que además, permitan establecer políticas óptimas para su reducción o incluso, eliminación si llegara a ser posible.
El siguiente artículo incide en la figura del control supervisor, tanto a nivel local como global, como herramientas capaces de reducir estos problemas.

Palabras Clave: Sistemas de Fabricación Reconfigurables, Bottleneck, Simulación Eventos Discretos, Restricciones Temporales, Algoritmos de control de datos en redes de comunicaciones

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción a los sistemas de Fabricación

Las empresas de fabricación actuales se encuentran inmersas dentro de un fenómeno denominado "Globalización de los Mercados"[3], este hecho afecta a las empresas de dos formas principalmente, una de ellas beneficiosa ya que aumenta de forma considerable sus clientes potenciales, pero una de forma negativa, aumenta la competencia.

Actualmente, las empresas se encuentran en un entorno cambiante, implicando cambios estructurales de las mismas, ya no son las empresas las que proponen al consumidor una serie de productos y éste no es más que un mero observador (tendencia

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

empresa-usuario), sino que en este mundo globalizado es el consumidor el que demanda nuevos productos, con una serie de características determinadas, invirtiendo la tendencia que hasta este momento se había dado en el entorno productivo, se tiende a productos más personalizados. Este fenómeno modifica en gran medida a las curvas características de los productos (Fig. 1), en las cuáles hasta la aparición de este fenómeno a partir de la etapa de introducción existía un tiempo bastante largo (varios años) de no inserción de nuevos productos. Con esta tendencia se deben de introducir productos cada vez con menos tiempo de etapa de desarrollo y de introducción (reducción de time-to-market) que satisfagan a los usuarios tanto en la calidad como en el diseño y a un precio reducido.

Esta personalización de los productos que atraen de una forma tan directa a los consumidores, son un reto para las empresas, la existencia de gran cantidad de productos diferentes en sus plantas, hace que la planificación de la producción no sea estática sino debe de ser dinámica, tanto en diversidad como en la cantidad de producto a fabricar.

El beneficio económico de las empresas, se basa en la producción de productos satisfactorios en todo momento para los consumidores, y en la generación de productos de forma continua, disminuyendo para ello el time-to-market (tiempo de aparición de un nuevo producto en el mercado desde su fase de incubación-desarrollo-producción). Esta necesidad de introducir periódicamente nuevos productos choca de pleno con las estructuras rígidas de los sistemas de fabricación, ya que en la actualidad los sistemas de fabricación celulares poseen un gran problema en su propia concepción, son sistemas flexibles capaces de realizar una amplia gama de productos pero su estructura es cerrada, el principal cuello de botella es su propia arquitectura de control, siendo una arquitectura propietaria y cerrada. La inserción de un nuevo producto se realizara de forma lenta ya que se deberá de diseñar, programar, etc.

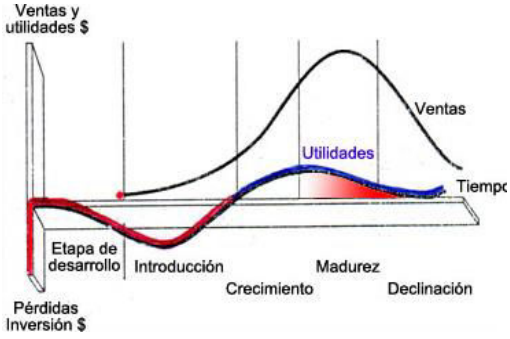


Figura 1. Ciclo de Vida de un Producto

Estos nuevos sistemas de fabricación deben de ser ágiles y flexibles manteniendo los niveles de producción y de calidad ante cambios drásticos en sus mercados potenciales. Algunas empresas basan su estrategia de mercado en introducir nuevos productos cada poco tiempo provocando en los consumidores unas expectativas continua son las empresas denominadas “Empresas líderes" (por ejemplo Apple), y otras, denominadas “Empresas Seguidoras" (caso de Samsung), con una cuota de mercado superior a las primeras introduciendo estas nuevas características en sus productos de forma lenta.

1.1.2. Evolución de los paradigmas de fabricación

Desde la revolución industrial hasta nuestros días, una de las principales preocupaciones de los sistemas de fabricación ha sido su adaptabilidad al mercado. Debido a esto los paradigmas de fabricación se han visto enfocados a la competitividad de las empresas.

- Sistemas de Fabricación Dedicados (DMS), también conocidos como fabricación en masa, introducidos por Henry Ford, caracterizada por la producción de una misma clase de productos utilizados en una l nea de ensamblad rígida. La clave de este tipo de sistema se encuentra en los altos niveles de producción a bajo coste. Estos sistemas requieren de niveles de producción estables, en el instante en el cual pierden esta estabilidad, no son rentables desde el punto de vista económico.

- Sistemas de Fabricación Celulares (CMS), se componen de un grupo de estaciones de trabajo en las cuales se va procesando un producto progresivamente sin esperas hasta que el lote ha finalizado. Este producto puede ser tanto un componente como un producto finalizado. Son sistemas que agrupan sus productos en familias a partir de unas ciertas características, siendo su producción continua puesto que pequeños cambios en el setup de las estaciones posibilitan la producción de los distintos productos. Los sistemas celulares se encuentran diseñados para una cierta cantidad de productos, cuya característica es que son productos con una demanda estable y con tiempos de vida elevados. La inserción de nuevos diferentes para los que fueron diseñados es complicado ya que son estructuras rígidas, además no son apropiadas para sistemas con fluctuaciones acusadas en su producción.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Sistemas de Fabricación Flexible (FMS), son de nidos como un sistema informático de producción controlada capaz de procesar una variedad de pie-zas. Su principal característica es la flexibilidad, pero mantiene una estructura rígida que impide una rápida respuesta a los cambios.

- Los sistemas de fabricación Reconfigurable (RMS). Este novedoso paradigma de fabricación viene a mitigar las carencias de los sistemas anteriores. Son flexibles tanto a nivel de diversidad como de capacidad de fabricación respondiendo de forma ágil a la fluctuación de los mercados [2].

  Además posee una arquitectura de control abierta con lo que la inserción de nuevos productos es mucho más simple que en el resto de sistemas.

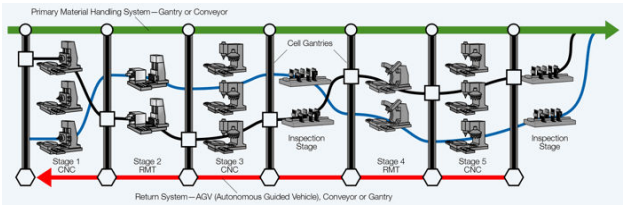


Figura 2. Sistema Reconfigurable de Fabricación

1.1.3 Concepto de Sistemas de Fabricación Reconfigurable

Los sistemas de fabricación reconfigurable, como se ha visto anteriormente, nacen de la necesidad de tener estructuras de fabricación adaptables a los mercados. Koren et al. (1999) definieron un RMS (reconfigurable manufacturing systems) como "un sistema de fabricación diseñado desde el comienzo para soportar cambios rápidos en su estructura tanto en sus componentes hardware como en sus componentes software para ajustar su capacidad productiva y funcionalidad de forma rápida dentro de una familia de piezas como respuesta a los repentinos cambios del mercado o imposiciones del regulador".

Los objetivos de los RMS, salvando el tema económico, son dos:

1. Reducción de tiempo de lanzamiento de nuevos productos y reconfiguración de los sistemas.

2. Rápida modificación e inserción de novedosos sistemas de fabricación.

Las principales características de un sistema RMS son modularidad, integrabilidad, convertibilidad, diagnosis y personalización (Mehrabi et al. 2000).

2. BOTTLENECK

De una forma muy burda, un cuello de botella no es más que una estrangulación del flujo normal (Fig. 3), dentro de los sistemas de comunicaciones se definiría como una interrupción del flujo de datos normales, en términos médicos sería una estrangulación de los vasos sanguíneos, etc.

En un sistema de fabricación un cuello de botella es una reducción del flujo productivo, esta reducción provoca grandes pérdidas económicas ya que como se ha comentado anteriormente los usuarios estamos provocando en las empresas gran competencia y disminución progresiva de los precios, y por tanto, de los márgenes de beneficio.

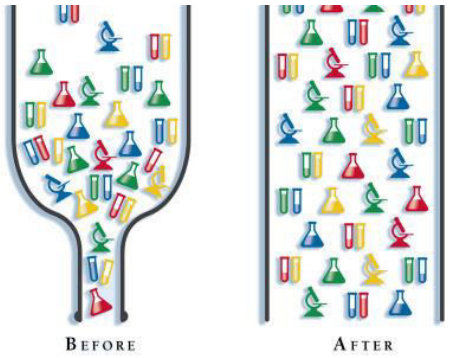


Figura 3. Concepto básico de Congestión

Por tanto, no es difícil comprender la utilidad de aquellos sistemas capaces de detectar con la suficiente antelación de la aparición de este tipo de problemas en las líneas de fabricación.

Los cuellos de botella son intrínsecos a la propia naturaleza de los sistemas de fabricación, pero su detección precoz y minimización de sus efectos son propias de los sistemas de fabricación ágiles.

Existe gran cantidad de bibliografía acerca de los cuellos de botella dentro de líneas de fabricación sobre todo en aquellas de estructura seriada, en las cuales una vez detectadas las máquinas con un alto grado de factor de utilización y por tanto, designadas como bottleneck se instalarán buffers intermedios que posibilite un flujo continuo de material desde la máquina designada como bottleneck hacia las máquinas siguientes.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3. CONTROL SUPERVISOR

El supervisor aparece como una necesidad ante la complejidad de los sistemas de fabricación. Su objetivo principal es establecer el correcto funcionamiento para los distintos estados del sistema.

En la etapa de diseño limitará el posible error del sistema. Para ello debemos realizar "el modelado del sistema". Es fácil pensar que el supervisor tiene que contener las características individuales de los elementos del sistema.

Las características principales de un control supervisor:

- ✓ Monitorización de la planta controlada.
- ✓ Detección y aislamiento de fallos.
- ✓ Diagnóstico.
- ✓ Toma de decisión (dependiendo de la disponibilidad).
- ✓ Ejecución de acciones de la nueva situación.
- ✓ Comunicación mundo exterior-intercambio de información.

4. EJEMPLO

El ejemplo a utilizar es el referente a un sistema flexible de fabricación flexible, compuesto por tres celdas seriadas y realizándose en cada una de ellas diferentes operaciones.

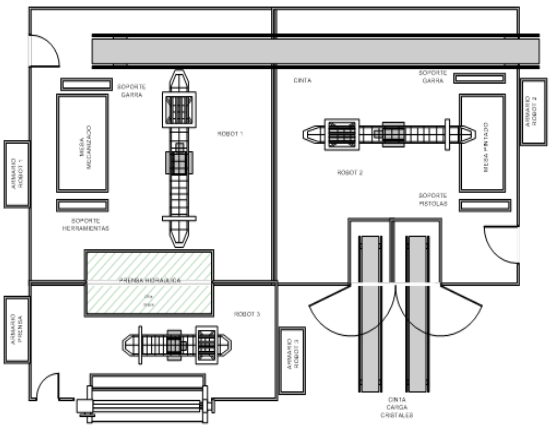


Figura 4. Celdas de Fabricación Flexible

Cada una de las celdas se encuentra compuesta por un brazo articulado (Robot) y un conjunto de controladores lógicos programables (PLC´s), cuya función es la de controlar cada uno de los diferentes recursos que componen dichas celdas. Estos recursos son máquinas de corte, sistemas de extracción de polvo, sistemas de lubricación, sistemas neumáticos, eléctricos, etc.

Para la construcción de cada uno de los controladores locales se ha utilizado la misma filosofía que en Lastra et alm (2011) [5] (Fig. 5).

Cada una de las celdas se encuentra controlada por un PLC (Controlador Lógico Programable), siendo éste el componente idóneo para albergar el control local de la planta física gracias a sus características implícitas de robustez y de fiabilidad.

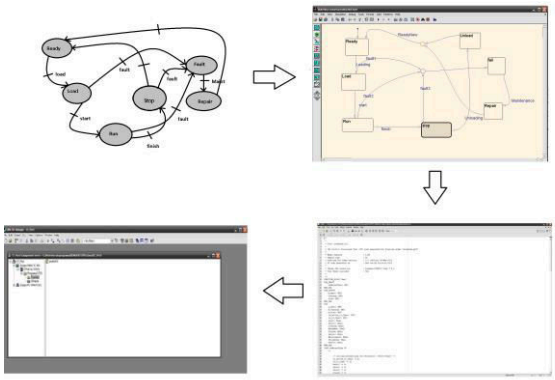


Figura 5. Construcción del Sistema de Control Local

El PLC ejecutará las distintas tareas a las ciclicidades demandadas por el propio proceso a controlar, además se utilizará gracias a su fácil implantación en la industria actual.

El control supervisor del sistema también se integrará en el propio PLC y su funcionamiento implicará una serie de reglas de control sobre el control estándar [7].

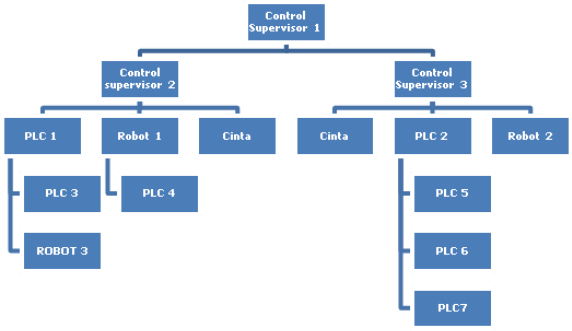


Figura 6. Arquitectura de Control

Gracias a la estandarización de los lenguajes de programación de los PLC´s (norma 61131-3) su implementación en cualquier tipo de sistema será rápida y fácil.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La arquitectura de control (Fig. 6) del sistema de fabricación utilizado en el ejemplo es una arquitectura jerárquica, dividida en dos capas de control supervisor (Fig. 7). El control de supervisor local, encargado del funcionamiento correcto de las celdas de forma individual (restricciones temporales operativas) y un Control Supervisor del sistema Global, cuya función es controlar el flujo productivo. Para ello utilizará todos los datos obtenidos de las capas inferiores y determinará el ritmo de funcionamiento del sistema (balanceo dinámico de la línea), con el fin de evitar o reducir el efecto de los cuellos o incluso de los bloqueos.

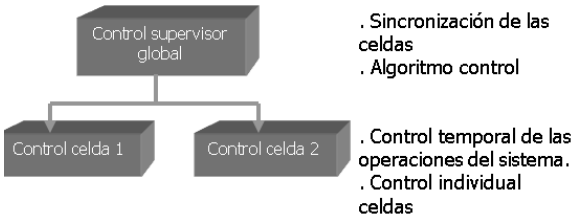


Figura 7. Arquitectura de Control y Principales funciones de los -Supervisores

La política de control del Supervisor General es totalmente diferente para cada uno de los defectos, mientras que para un defecto de Congestión modificará la velocidad de ejecución para las diferentes tareas, por tanto, estableciendo nuevos parámetros para el balanceo de la línea e limitando al máximo dicho defecto mediante un algoritmo de ruteo óptimo (algoritmo de Bellman-Ford) y para un defecto de bloqueo, el controlador tomará la decisión de detener determinadas tareas con el fin de salir de dicho defecto, por tanto, reduciendo drásticamente el flujo producto (algoritmo de Congestión-Arranque lento).

Este buffer intermedio permitirá la estabilización del sistema global en caso de divergencia en los tiempos de fabricación entre celdas.
Durante un funcionamiento correcto las restricciones temporales para cada una de las operaciones (Fig. 8) se cumplen, de tal forma, que el flujo de piezas del sistema productivo es constante, por tanto, el buffer se mantiene dentro de los valores estables.

En el instante en el cual comienzan a existir retrasos (Fig. 9), el conjunto comienza a producirse divergencia temporal entre las celdas y comienza a aumentar el buffer intermedio (Cinta). En la siguiente figura se muestra dicho fenómeno, el controlador local no cumple las restricciones temporales con lo que aparece un retraso. Este retraso impide un flujo correcto de piezas en el sistema produciendo una congestión en el mismo, si está congestión alcanza los valores máximos del buffer y no se establece ningún tipo de política de mitigación del defecto podría desembocar en un bloqueo parcial o total del sistema productivo.

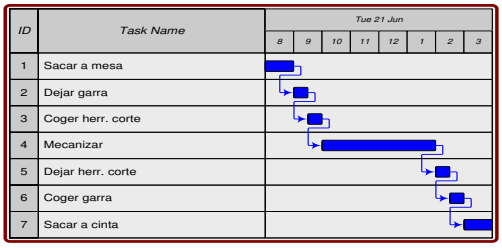


Figura 8. Diagrama de Gantt Sistema Controlado

El sistema de fabricación se ha modelado como un sistema de eventos discretos [4]. Para ello se ha utilizado la herramienta de desarrollo Matlab/Simulink, y más concretamente las toolbox de Simulink Stateflow y SimEvent. Mediante Stateflow se modelará la operativa propia de cada una de las celdas, máquinas funcionando, estado de fallo, etc, y mediante SimEvent se modelará el trasiego de piezas interceldas y entre celdas contiguas.

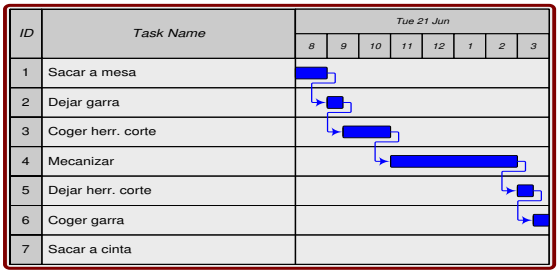


Figura 9. Diagrama de Gantt Sistema Bajo Fallo

Stateflow es una representación gráfica de una máquina de estados finitos (FSM), la cual se compone de un número de elementos básicos los estados, las transiciones, los eventos, las variables,etc.

A continuación se muestra la máquina de estados finitos para una máquina tipo, compuesta por tres estados, uno de espera (carga y descarga del material), un estado de operando y un estado de fallo, las transiciones entre los estados se produce de distintas formas, a través de eventos como puede ser el pulsador de start o el fallo de la máquina, o a

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

través de variables locales, como puede ser la finalización del procesado de la pieza.

El funcionamiento del sistema se iniciaría con una carga automática del sistema con lo que el primer estado se encontraría activo, dicho estado pasaría a estar desactivado en el instante de start al procesado de esa materia prima, activando el estado de Machine_run y permaneciendo activo hasta el final del procesado de la misma o hasta la ruptura de dicha máquina, en un ciclo normal la pieza se descargaría de forma automática y volvería de nuevo a realizarse el ciclo, en caso de defecto, pasaría al último estado y permanecería aquí hasta que el defecto se haya solucionado.

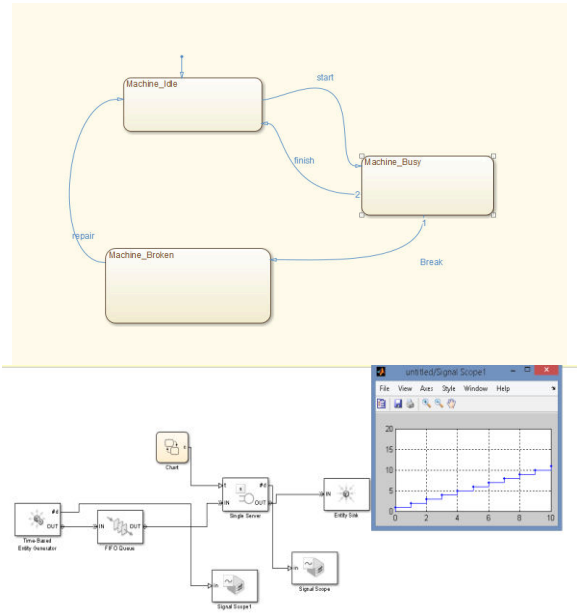


Figura 10. Stateflow & SimEvents Local Celda De Fabricación

Una vez se ha construido el entorno de simulación en SimEvents, se comienza a simular el sistema y se introducen pequeñas perturbaciones en los tiempos de ejecución de las tareas de tal forma que se vayan produciendo cambios en los tiempos de ciclo para cada una de las celdas.

Estos cambios en las celdas producirán a su vez una variación de las piezas en la cinta de conexión entre las celdas.

Esta variación en el buffer intermedio producirá a su vez los defectos en el flujo productivo anteriormente citados, siendo el caso más grave, el bloqueo total o abrazo mortal, en el cual el sistema queda totalmente bloqueado. Para evitar este fenómeno se supervisa constantemente los tiempos para cada una de las operaciones en las celdas, en el instante en el cual existe esa variación se consulta la capacidad del buffer y dependiendo de su estado, se transferirá una serie de órdenes a los controladores locales.

Estas órdenes modificarán la velocidad ejecución de las diferentes operaciones de las celdas y por consiguiente, modificarán el paso de las piezas de una celda a otra. Debido a que es un sistema dinámico es de vital importancia el control temporal de cada una de las operaciones.
Pasos desarrollo del Sistema Supervisor Global (Fig. 11)

1. El estado del sistema se modifica en tiempo real evitando el bloqueo.
2. La falta de coordinación entre celdas provoca bloqueo.
3. La función del supervisor: establecer condiciones para evitar bloqueo, y minimizar tiempo.
4. El Control Supervisor conoce en todo momento tiempos de operaciones, y determina retraso entre celdas.
5. Buffer indicador de falta de sincronización.
6. Estado erróneo. Utilización algoritmo de Reinicio del Sistema. Sistema pasa a estado correcto.

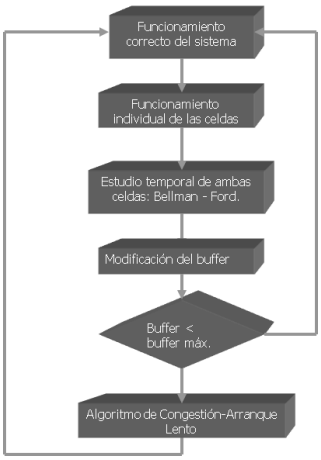


Figura 11. Pasos Control Supervisor

A continuación (Fig. 12) se muestra mediante un diagrama de flujo el sistema de fabricación global, las relaciones entre los supervisores locales y el supervisor global, junto con los algoritmos que realizan el control de las mismas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Conclusiones

En el artículo aquí presentado se hace una breve introducción a una potencial solución a los defectos anteriormente citados, basados en la teoría del Control Supervisor. La arquitectura de control diseñada es una arquitectura de control jerárquica

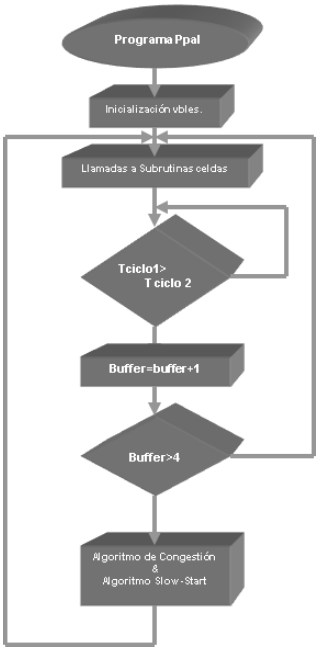


Figura 12. Diagrama de flujo
Programa Simulación

donde los supervisores locales modifican su comportamiento a partir de la operativa demandada por el Supervisor Global.

En la actualidad se viene desarrollando un sistema que podría alcanzar especificaciones de alta fiabilidad en cuanto al flujo productivo, donde los posibles errores se están simulando mediante diferentes algoritmos matemáticos. De este modo se viene realizando una acción preventiva a la aparición de conflicto: Reconocimiento de bloqueo, retardos y desfases en la secuencia de procesamiento.

Referencias

[1] Forouzan, B. A.; "Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones"; 2 ª ed.; McGraw-Hill, 2002

[2] Koren Yoram, (2010), "General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems", Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories (Springer), pp.27-45.

[3] KorenYorem,(2010)"The Global Manufacturing System", Wiley.

[4] Lafortune S., Cassandras C. (2008), Introduction to Discrete Event Systems, Springer.

[5] Lastra F., Trujillo J., Llata J., "Diseño de Control Inteligente en sistemas Holónicos de Fabricación", Jornadas Automática 2011.

[6] Mehrabi, M.G., Ulsoy, A.G., Koren, Y. and Heytler, P., Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. J. Intell. Manuf., 2002, 13, 135–146..

[7] Ramadge P.J., Wonham W.M., (1987) Supervisory Control of a Class of discrete event processes, SIAM J. Control and Optimization.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

NAVEGACIÓN LOCAL DE UN ROBOT MÓVIL CON COSTES SOCIALES APRENDIDOS POR DEMOSTRACIÓN

Noé Pérez-Higueras, Rafael Ramón-Vigo, Luis Merino
Universidad Pablo de Olavide, Crta. Utrera km1, E-41013, Sevilla, España, noeperez@upo.es, rramvig@upo.es, lmercab@upo.es

Fernando Caballero
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, E-41092, Sevilla, España, fcaballero@us.es

Resumen

La navegación de robots en entornos con humanos es un área de investigación que plantea serios retos. El sistema de navegación propuesto extiende los esquemas de navegación incorporando habilidades sociales. Para ello, se propone el uso de técnicas de aprendizaje automático para derivar funciones de coste social observando a peatones caminando entre ellos. El objetivo es incorporar tales funciones de coste a nivel de planificación local, proveyendo controles de bajo nivel directamente al robot. El artículo presenta un análisis de los resultados de navegación en diversos escenarios reales, analizando y comparando esta estrategia con otros algoritmos.

Palabras clave: Navegación Social, Robótica de Servicio, Aprendizaje por Demostración

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto europeo FROG[1] (*Fun Robotic Outdoor Guide*), subvencionado por el VII Programa Marco de la Comisión Europea, aspira a desarrollar un robot guía para sitios turísticos. Mientras que los robots guías han sido desarrollados durante más de una década [20, 18], este proyecto aporta como novedad el desarrollo de comportamientos sociales integrando reacciones sociales, además de una operatividad robusta en escenarios en exteriores y muy concurridos.

En el proyecto se utilizarán como escenarios el zoo de Lisboa y el Real Alcázar en Sevilla (ver Figura 1). La actuación en este tipo de escenarios (el Real Alcázar puede tener hasta 5000 visitantes por día, haciendo un total de 1.5 millones de visitantes por año) implica, no solo una navegación segura y eficiente, sino también una interacción social cuando el robot realiza sus tareas.

La planificación del movimiento de robots que comparten el espacio con humanos en entornos dinámicos es un tema de intensa investigación. Los robots deben respetar las convenciones sociales, garantizar el confort de las personas que lo rodean, y mantener la legibilidad, de manera que los humanos puedan entender las intenciones de los robots [11]. En primer lugar, el robot debe ser capaz de detectar personas, estimar sus posiciones y diferenciarlas de los obstáculos estáticos y dinámicos. Para la detección y seguimiento de personas han sido utilizados láseres [3, 4], o sistemas de visión. En el proyecto FROG, además de láseres, se utiliza un sistema de visión estéreo, capaz de proveer las posiciones y orientaciones de las personas en tiempo real [5, 9].

Figura 1: Situación típica del Real Alcázar de Sevilla, utilizado como escenario en el proyecto FROG.

Una vez que el robot tiene la información de las personas de alrededor, el sistema de navegación debe considerarlas de manera diferente a otros obstáculos del entorno para lograr una navegación social. Los planificadores de caminos actuales no resuelven el problema de navegación social, ya que tratan de minimizar la distancia y el tiempo empleado en alcazar el objetivo, lo que no genera, en general, un camino social. Algunos autores, han incluido costes y restricciones relativas a la navegación social en los planificadores para obtener caminos aceptables socialmente [19, 10], pero estos costes son pre-programados, y pueden dirigir a un comportamiento social inadecuado.

Por consiguiente, aprender estos costes y modelos a partir de datos, parece una aproximación más apropiada. En los últimos años, se han presentado muchas contribuciones en esta dirección: un aprendizaje supervisado es empleado en [21] para aprender modelos de predicción de movimiento de personas; o en [14], se utiliza aprendizaje no supervisado para determinar prototipos de movimiento

[1] http://www.frogrobot.eu

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

sociales, empleados para inferir costes sociales al planificar rutas.

Otra técnica potencial, es el aprendizaje por demostración [2]: un experto indica al robot como debería navegar entre los humanos. Una manera de implementarlo es a través de *Inverse Reinforcement Learning (IRL)* [1], en el cual una función de recompensa (o coste) es extraída del comportamiento del experto, y posteriormente utilizada para obtener una política de comportamiento para el robot. Mientras que una política directa de estado a acción también puede ser aprendida de ejemplos, el aprendizaje de una función de recompensa permite transferir la tarea a otras situaciones.

En este trabajo, los costes o recompensas son empleados para aprender políticas de ejecución locales, proveyendo directamente los controles de movimiento al robot. Esto puede ser combinado con otras técnicas de planificación a más alto nivel, y a la vez, aliviar la complejidad asociada al aprendizaje. Además, se ha utilizado un set de datos de personas caminando en espacios públicos para aprender las funciones de costes. Finalmente, se analiza y compara este enfoque con otras técnicas.

La estructura del artículo es la siguiente: a continuación, se describe la plataforma robótica utilizada y la arquitectura de navegación implementada. Después, en la sección 3, se muestra el proceso de aprendizaje. En la sección 4 se muestran los resultados de los experimentos realizados, y se finaliza con las conclusiones y trabajo futuro planteado.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

2.1. ROBOT FROG

La figura 2, muestra una imagen del robot FROG. Consiste en una plataforma de 4 ruedas con guiado diferencial, adaptada a los escenarios considerados en el proyecto. La plataforma ha sido desarrollada por la empresa portuguesa IDMind. Tiene una autonomía de 2 a 4 horas, dependiendo del tipo de suelo y el número de computadores embebidos en ejecución (hasta un total de 3). El peso del robot es de 80 kg aproximadamente y su velocidad máxima es de 1.6 km/h (limitada por software a 0.8 km/h).

El robot está equipado con un amplio rango de sensores para la localización, navegación y seguridad. Entre ellos, los siguientes sensores son considerados para la detección de personas y la navegación:

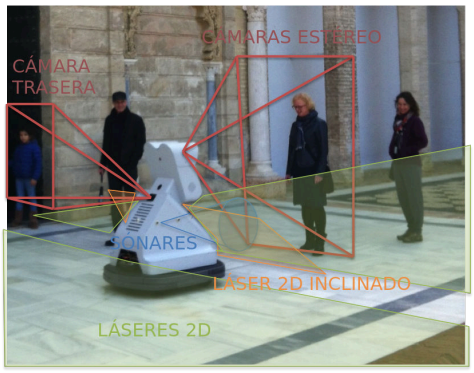


Figura 2: Robot con las posiciones y campo de visión de los sensores. Los planos verdes denotan a los láseres frontal y trasero. Plano naranja representa el láser inclinado 45°. Las áreas rojas denotan los campos de visión de las camaras estéreo frontales y la cámara trasera. El área azul representa las zonas de detección del sónar.

- La odometría es calculada mediante la lectura de los encoders de las ruedas y las velocidades angulares del sensor MTi-G IMU de la empresa Xsens.
- Se emplean tres láseres 2D. Dos dispuestos horizontalmente, situados en el frente y en la parte trasera, y utilizados para la localización, evitación de obstáculos y detección de personas. El tercer láser está situado en el frente del robot y girado 45º. Se emplea para la detección de obstáculos en 3D.
- Un par de cámaras stereo, empleadas en la detección de personas, estimación de la posición y percepción 3D.
- Un par de sónares situados en los laterales, que se utilizan para detección de obstáculos.

En el robot FROG, se ha intentado disponer los sensores a fin de cubrir todo el área posible alrededor del robot. Los láseres frontal y trasero cubren un ángulo total de 360º alrededor del robot. Además, los sónares son utilizados para detectar obstáculos en las zonas laterales que no pueden ser cubiertas por los láseres, además de obstáculos a diferente altura que los láseres. El láser inclinado, situado justo debajo de la pantalla y girado 45° grados en el eje de elevación, también se emplea para detectar obstáculos en un rango cercano y que no son visibles para el láser frontal (pequeños escalones hacia arriba o hacia abajo).

Considerando el aspecto clave de la detección de personas, el principal sensor utilizado es el par de cámaras estéreo, cuyas imágenes son utilizadas por el algoritmo de detección de personas [5, 9].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

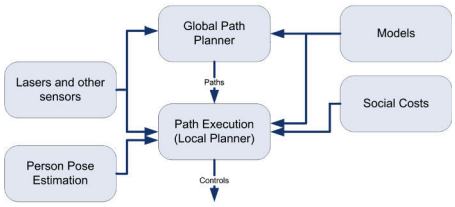


Figura 3: Esquema del sistema de navegación.

Además, una segunda fuente de información ha sido añadida para incrementar el área de detección de personas. Se trata de un algoritmo de detección de personas basado en laser 2D [3]. Este algoritmo, no es tan preciso como el algoritmo de visión pero es lo suficientemente fiable para proveer buenas estimaciones de las personas alrededor del robot.

2.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN

El sistema de navegación implementado en el robot FROG, sigue el esquema clásico de separación entre un planificador de caminos global y un controlador de ejecución del camino local (ver Fig. 3). El planificador global emplea la posición global del robot y modelos globales de obstáculos (mapa), y potencialmente otros modelos, para determinar una ruta a la meta. El planificador local recibe el camino global e intenta seguirlo, considerando la información actual proporcionada por los sensores en el marco del robot. Este controlador, genera los controles (velocidad angular y lineal) enviados al robot.

La actual implementación del sistema de navegación hace una extensión de la arquitectura de navegación implementada en el *Robot Operating System (ROS)* [15]. Se ha centrado principalmente en la adaptación del planificador local, aunque se han llevado a cabo también modificaciones significativas para adecuar el planificador global a los requerimientos del proyecto FROG. El planificador global está basado en el algoritmo de Dijkstra para realizar una búsqueda en el espacio de trabajo disponible y encontrar el mejor camino. En futuros trabajos, se planea considerar también restricciones a este nivel.

Como planificador local se ha considerado una extensión del algoritmo *Trajectory Rollout* [6]. El algoritmo ha sido reimplementado considerando la eficiencia computacional como mayor restricción. Este controlador simula las posibles futuras trayectorias del robot en un horizonte de tiempo discreto. Para asegurar la seguridad y la viabilidad de los movimientos, las restricciones cinemáticas del robot y las aceleraciones deben ser correctamente indicadas. El controlador, después, escoge la mejor trayectoria evaluando diferentes funciones de coste que puntúan los diferentes objetivos del robot, tales como la distancia al camino global, distancia a la meta local o el coste por obstáculos, entre otros. Esta técnica ha sido modificada para añadir unos términos adicionales considerando costes sociales, los cuales son aprendidos a partir de los datos de interacciones humanas. Basado en la estimación de la posición de las personas, el controlador añade los correspondientes costes sociales, que modifican los comandos de velocidad enviados a el robot.

3. APRENDIZAJE DE LA FUNCIÓN DE COSTE

La principal hipótesis del presente artículo es que la mejor manera de obtener comportamientos de navegación socialmente aceptables es observar como los humanos navegan entre ellos, y emular estos comportamientos en el robot; para ello, se emplea la técnica de *Inverse Reinforcement Learning* (IRL) [1] para aprender la función de coste social.

IRL asume que el experto del cual queremos aprender puede ser modelado por un Proceso de Decisión de Markov (o MDP en sus siglas inglesas). Formalmente, se define un MDP discreto como una tupla $\langle S, A, T, R, D, \gamma \rangle$. El *espacio de estados* es el conjunto finito de posibles estados $s \in S$; *el espacio de acciones* se define como el conjunto finito de acciones posibles $a \in A$. En cada paso, se lleva a cabo una acción y una recompensa es obtenida (o inferido un coste). Después de realizar una acción a, la transición de estado es modelada por la función de probabilidad condicional $T(s', a, s) = p(s'|a, s)$. Entonces, en cada instante de tiempo, se observa el nuevo estado. La recompensa obtenida en cada paso se denota como $R(s, a)$. A la función $a = \pi(s)$, que devuelve una acción para un estado, se le denomina política. La política que maximiza la suma de las recompensas esperadas, o *valor*, obtenida durante D pasos temporales $E[\sum_{t=0}^{D} \gamma R(s, a)]$, es llamada una política *óptima*. Para asegurar que la suma es finita cuando $D \to \infty$, las recompensas son pesadas por un factor de descuento $\gamma \in [0, 1)$.

El objetivo de IRL es determinar la función de recompensa $R(s, a)$ que el experto está siguiendo por medio de la observación del experto actuando en el mundo real, asumiendo que está ejecutando una política de acuerdo al MDP dado. En muchos casos, se puede asumir que la función de recompensa depende de un conjunto de características $\theta(s)$, las cuales son funciones del estado.

La idea de la utilización de IRL para la navegación

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de robots fue propuesta por Peter Henry [8], para estimar funciones de coste para la planificación global de rutas para el robot. Aquí, se presentan multiples diferencias a la propuesta de Henry, las cuales serán descritas en las siguientes secciones.

3.1. MODELOS

El aspecto más relevante de este planteamiento es la definición del modelo del MDP, y, en particular, el espacio de estados y las características del estado de las cuales depende la función de recompensa. Esto consituye la mayor hipótesis considerada en este trabajo.

Además, a fin de aliviar la complejidad del problema, se han utilizado dos modelos. El primero sólo considera las características relativas a los movimientos entre pares de personas cuando se cruzan. El segundo está basado en características de más alto nivel, tales como las densidades de personas en diferentes áreas delante del robot. En la sección 4, se discutirán los resultados obtenidos con los modelos.

3.1.1. Modelo 1

En principio, las acciones de una persona (o robot) navegando entre otras dependerán del estado de todas las personas cercanas al robot, además de otros factores, como obstáculos y la meta a la que dirigirse. Sin embargo, el considerar a todas las personas, implicaría el tratar con un espacio de estados grande (y de tamaño variable a lo largo del tiempo). Aquí, sólo se consideran en el modelo los movimientos relativos entre dos personas (un robot/experto y una persona), parametrizando el estado en el marco local del robot/experto. Esto permite reducir la complejidad del problema.

De esta manera, se ha definido el estado como la posición relativa y orientación de la persona respecto al robot, denotada como $s = \begin{pmatrix} d & \theta & \varphi \end{pmatrix}^T$ (Figura 4). Como la parametrización es local, la posición del robot no es considerada en el estado. Por otro lado, los efectos de las acciones en el estado son modeladas utilizando ecuaciones cinemáticas, las cuales son consideradas deterministas. La incertidumbre se ha añadido en la parte del movimiento de la persona, muestreando diferentes variaciones de las velocidades lineal y angular de la persona, y determinando su posición futura. De esta manera, se ha determinado la función de transición $T(s', a, s)$. Otra hipótesis que será analizada en este artículo, es si el modelo puede ser extrapolado a los casos con más personas, aplicando la función de coste aprendida, no solo a la persona más cercana, sino a todas las personas presentes en la escena.

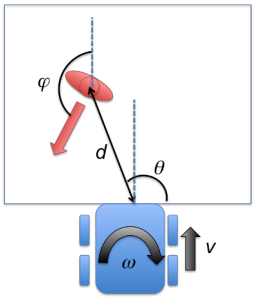


Figura 4: El estado del modelo 1 se define como la posición relativa de la persona con respecto al robot.

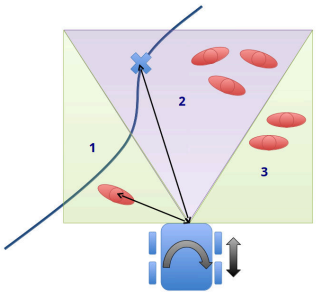


Figura 5: El estado en el modelo 2 se define con los valores de densidad ($personas/m^2$) en las 3 regiones.

3.1.2. Modelo 2

El segundo modelo MDP propuesto, se basa en características de más alto nivel para definir la función de coste. En particular, se han considerado las densidades de personas en diferentes áreas delante del robot. En este caso, se ha utilizado el mismo área que en el modelo 1, pero dividida en tres regiones independientes, como puede verse en la Figura 5.

Por lo tanto, el estado se codifica como $s = \begin{pmatrix} \rho_1 & \rho_2 & \rho_3 \end{pmatrix}^T$. El valor de densidad para cada región ha sido dividido en 5 intervalos de rango 0,25 $personas/m^2$, exceptuando el primer intervalo que corresponde al valor cero de densidad. De este modo, la función de transición $T(s', a, s)$, se determina considerando como las densidades en las regiones son afectadas por el movimiento del robot. Al mismo tiempo, la incertidumbre es añadida en los nuevos valores de densidad, debido al flujo de entrada y de salida de personas de las regiones.

El desarrollo de este modelo aspira a complementar el primer modelo de manera simple. La idea es intentar capturar otros comportamientos de navegación en entornos concurridos, que el primer modelo no considera al tener solo en cuenta a la persona más cercana. De esta manera, la comple-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

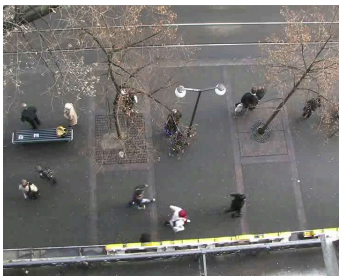


Figura 6: Imagen ejemplo del set de datos utilizado en el aprendizaje [16].

jidad del problema y el coste computacional se ve reducido al dividir el proceso de aprendizaje en dos funciones de recompensa distintas. Posteriormente, se pueden usar las dos funciones de recompensa obtenidas con los dos modelos, y añadirlas al sistema de navegación local como dos costes más o combinarlas en un solo coste. Los resultados obtenidos se mostrarán en la sección 4.

3.1.3. Aprendizaje

Para resolver el problema de IRL, se ha considerado el algoritmo *Gaussian Process IRL (GPIRL)* [13]. La principal diferencia con otros algoritmos es que emplea un proceso Gaussiano para aprender una función de recompensa no lineal sobre el espacio de características. De este modo, el proceso Gaussiano permite extrapolar la función aprendida a otros espacios de estados dentro del dominio de las características consideradas.

Como fuente de ejemplos de navegación de personas, se ha utilizado el set de datos denominado *BIWI Walking Pedestrian Dataset*[2] [16]. Éste, consiste en una vista de pájaro de un entorno en exteriores urbano, y contiene anotaciones de las posiciones y velocidades de todas las personas y sus correspodientes marcas de tiempo (véase la Figura 6). Para extraer los ejemplos, se seleccionó como ¨expertos¨ a un conjunto de personas de entre los peatones que están en movimiento en el dataset. Para cada punto de la trayectoria seguida por un experto, se extrajo:

- El estado del modelo 1, $s_i = \begin{pmatrix} d & \theta & \varphi \end{pmatrix}^T$ de la persona más cercana dentro de la zona de planificación local.
- Modelo 2, el estado $s_i = \begin{pmatrix} \rho_1 & \rho_2 & \rho_3 \end{pmatrix}^T$.
- La acción realizada por el experto en el mismo instante de tiempo. En particular, las velocidades lineal y angular $a_i = \begin{pmatrix} v & \omega \end{pmatrix}^T$.

[2]http://www.vision.ee.ethz.ch/datasets/

De este modo, para cada experto, se almacena la trayectoria $\{s_i, a_i\}_{i=1}^N$ como un episodio para la fase de aprendizaje. El algoritmo GPIRL utiliza un PDM discreto como modelo. Por lo tanto, los espacio de estados y acciones son discretizados considerando cómo los expertos y los peatones se comportan en el set de datos.

Finalmente, utilizando los ejemplos extraídos del set de datos y aplicando el algoritmo de IRL, se obtiene una función de recompensa (o de coste) $R(s, a)$, que asocia un valor escalar a cada uno de los estados. Una explicación más detallada del proceso de aprendizaje puede verse en [17]. Este valor es utilizado como nuevo coste añadido en el algoritmo de planificación local.

4. EXPERIMENTOS

En esta sección se mostrarán los experimentos reales realizados con la plataforma robótica, integrando los subsistemas descritos anteriormente. En estos experimentos, el robot navegó de forma autónoma desde un punto inicial a un punto final dado, encontrando peatones en el camino.

Los experimentos evalúan el sistema planteado comparándolo con un planificador local clásico [6], y con un planificador basado en costes extraídos de la clásica teoría de proxémica [7].

Los resultados son comparados utilizando como métricas la distancia total recorrida hasta la meta, medida en metros (DT), el tiempo total de ejecución en segundos (T), y las distancias mínima y media a los peatones en metros (*DP min* y *DP med* respectivamente). Estas métricas son mostradas junto con sus desviaciones estándar. Con los valores del tiempo de ejecución y la distancia total recorrida, se pretende evaluar la efectividad para alcazar la meta, mientras que con las distancias a las personas, se puede evaluar cómo el espacio personal es conservado.

4.1. EXPERIMENTOS CON PEATONES ESTÁTICOS

En este conjunto de experimentos, el robot tuvo que cruzar un área controlada con peatones parados de pie, hablando los unos con los otros. Se trata de un escenario estático en el sentido de que las personas no se mueven de su posición inicial durante el experimento. Se realizaron 4 repeticiones para cada uno de los planificadores, manteniendo la misma configuración de las personas.

Se muestran los resultados para los siguientes planificadores locales planteados: navegación básica sin la componente social [6] (No soc.), planificador con una aproximación proxémica (Prox.), planifi-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cador con el coste social obtenido con el modelo 1 (M1), planificador utilizando una generalización del modelo 1, considerando a todos los peatones (M1 T), planificador con el coste social obtenido con el modelo 2 (M2), y finalmente, un planificador que emplea conjuntamente los costes obtenidos por los modelos 1 y 2 (M1+M2). El cuadro 1, resume los resultados obtenidos, que son comentados a continuación:

- No social. Parece claro que la navegación sin la componente social, intenta optimizar el tiempo y la distancia recorrida. De forma que, la distancia media a los peatones es la más baja de todas las aproximaciones.
- Coste proxémico. Este planificador mejora ligeramente los resultados de la navegación "no social". Sin embargo, como se comenta en [14], la proxémica está orientada a la interacción de personas, y puede no ser adecuada para la navegación, realizando maniobras de evasión innecesarias cuando el robot está muy cercano a la persona.
- Modelo 1. El planificador con el coste social obtenido con este modelo, mejora los resultados de la proxémica. Conserva una mayor distancia a las personas que en el caso "no social" y anticipa las maniobras de esquiva mucho antes que la proxémica. Este comportamiento puede ser adecuado en escenarios no muy concurridos, pero el rendimiento puede decaer con muchas personas alrededor del robot.
- Modelo 1 generalizado a todas las personas. De acuerdo a los resultados, el rendimiento es similar al caso anterior. Estos resultados podrían variar en experimentos con más gente, pero en cualquier caso, esta generalización no consigue capturar los aspectos clave necesarios para una buena navegación en sitios concurridos.
- Modelo 2. En este caso, las distancias a los peatones son menores que en el caso del modelo 1 y su generalización. Sin embargo, aspectos como la orientación o la dirección de movimiento de los peatones, no son tenidos en cuenta, lo que puede llevar a comportamientos de evasión indeseados.
- Modelo 1 + Modelo 2. La adición conjunta de los costes obtenidos por los dos modelos, permite realizar maniobras de esquiva no excesivas y con mayor antelación que el caso proxémico. Además, mantiene una menor distancia a las personas que sólo el modelo 1, sin resultar incómodo para ellas. Se puede considerar que, de las propuestas analizadas, éste es el comportamiento más apropiado para entornos concurridos.

Cuadro 1: Resultados en un escenario estático

	T	DT	DP med	DP min
No soc.	$50{,}65 \pm 0{,}21$	$21{,}76 \pm 0{,}29$	$2{,}82 \pm 0{,}06$	$0{,}82 \pm 0{,}03$
Prox.	$71{,}00 \pm 1{,}55$	$21{,}09 \pm 1{,}04$	$3{,}69 \pm 1{,}69$	$1{,}05 \pm 0{,}18$
M1	$54{,}28 \pm 3{,}39$	$20{,}50 \pm 0{,}22$	$5{,}19 \pm 1{,}06$	$1{,}29 \pm 0{,}18$
M1 T	$58{,}85 \pm 0{,}21$	$22{,}68 \pm 0{,}19$	$5{,}22 \pm 1{,}69$	$1{,}69 \pm 0{,}04$
M2	$51{,}05 \pm 0{,}92$	$24{,}53 \pm 0{,}01$	$4{,}50 \pm 0{,}21$	$0{,}87 \pm 0{,}02$
M1+M2	$53{,}27 \pm 3{,}17$	$21{,}19 \pm 1{,}56$	$4{,}00 \pm 1{,}82$	$1{,}01 \pm 0{,}29$

Cuadro 2: Resultados en un escenario dinámico

	T	DT	DP med	DP min
No soc.	$59{,}22 \pm 0{,}06$	$20{,}38 \pm 0{,}29$	$2{,}31 \pm 0{,}15$	$0{,}20 \pm 0{,}09$
Prox.	$68{,}44 \pm 0{,}02$	$20{,}99 \pm 0{,}68$	$2{,}59 \pm 0{,}10$	$0{,}38 \pm 0{,}04$
M1	$69{,}45 \pm 7{,}01$	$21{,}85 \pm 1{,}89$	$4{,}46 \pm 0{,}19$	$0{,}20 \pm 0{,}17$
M1 T	$61{,}20 \pm 0{,}0$	$20{,}50 \pm 0{,}0$	$2{,}49 \pm 0{,}16$	$0{,}60 \pm 0{,}12$
M2	$65{,}26 \pm 10{,}08$	$20{,}75 \pm 0{,}24$	$2{,}56 \pm 0{,}17$	$0{,}47 \pm 0{,}16$
M1+M2	$60{,}20 \pm 1{,}81$	$20{,}36 \pm 0{,}35$	$2{,}46 \pm 0{,}10$	$0{,}33 \pm 0{,}02$

4.2. EXPERIMENTOS CON PEATONES DINÁMICOS

Para realizar estos experimentos, se empleó el mismo escenario citado anteriormente, pero en este caso, los peatones estaban en movimiento cruzando el área. De nuevo, se realizaron 4 repeticiones con las mismas condiciones para cada uno de los planificadores propuestos.

La disposición de los peatones en el experimento fue la siguiente: dos peatones caminan en dirección opuesta al robot obligándolo a esquivarlos. Después, otro peatón cruza en diagonal por delante del robot. Finalmente, dos nuevos peatones, adelantan caminando al robot por su izquierda.

Los resultados se muestran en el Cuadro 2. Como puede observarse, los resultados son muy similares a los obtenidos en el caso del escenario estático. De nuevo, todas las aproximaciones "sociales" mejoran al comportamiento "no social". Particularmente, el modelo 1 parece realizar maniobras de evitación un poco exageradas. Por otro lado, el planificador mixto (modelo 1 y 2), parece mantener una distancia aceptable a los peatones en entornos concurridos y maniobras de esquiva más suaves.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.3. EXPERIMENTOS EN ESCENARIOS OBJETIVO

4.3.1. Zoo de Lisboa

En la revisión del segundo año del proyecto FROG, se realizó una demostración en el zoo de Lisboa, mostrando las capacidades del robot desarrolladas hasta el momento. El robot guió a los visitantes por el zoo mostrando los animales, y aportando datos sobre las especies, su comportamiento y su hábitat natural.

La guía abarca una ruta de unos 750 metros de distancia, con diferentes puntos de interés, y una duración de unos 45 minutos aproximadamente. Durante la semana de pruebas, la distancia total recorrida de forma totalmente autónoma fue de más de 3 km.

Esta demostración, en la cual aún no se incluyeron las componentes sociales entre las funcionalidades de navegación, probaron la robustez y precisión de localización para la navegación en un escenario en exteriores tan desafiante.

4.3.2. Real Alcázar de Sevilla

Otro conjunto de experimentos fue llevado a cabo en el Real Alcázar de Sevilla, donde tendrá lugar la evaluación final del proyecto FROG. En este caso, los experimentos se realizaron empleando el planficador local aumentado con los costes sociales provinientes de los modelos 1 y 2 (Figura 7).

La visita guiada por el robot tiene una distancia de unos 525 metros aproximadamente, incluyendo el camino de vuelta a la posición inicial. La ruta fue realizada, satisfactoriamente, dos veces al día durante 8 días seguidos, lo que suma un total de 8,4 km de navegación autónoma en un escenario muy concurrido.

El comportamiento social del robot se mostró adecuado en la mayoría de los casos. La navegación fue bastante segura para los visitantes y el robot fue capaz de esquivar a los personas con antipación realizando giros suaves al detectarlas caminando en la dirección opuesta.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo resume el sistema de navegación desarrollado en el marco del proyecto europeo FROG. El sistema implementa una navegación eficiente y segura, de acuerdo a las especificaciones del proyecto, prestándo especial atención al aspecto de la interacción social de la navegación. Se ha presentado una propuesta que hace uso de la técnica *IRL* para aprender las funciones de recompensa/coste a partir de ejemplos de personas navegando entre otras personas. Además, se han descrito dos modelos simples y el uso de un set de datos público para extraer los ejemplos de aprendizaje.

Figura 7: Izquierda: gente rodeando al robot en el Real Alcázar. Derecha: detección de personas en 360° alrededor del robot (cilindros verdes).

Todas las diferentes propuestas han sido comparadas entre ellas, y con una navegación básica y una aproximación basada en proxémica. Los resultados muestran que IRL puede ser usado para transferir algunos comportamientos de navegación humanos en el controlador de navegación de bajo nivel de un robot móvil. Este controlador mejora ligeramente el rendimiento del planificador basado en proxémica, y es capaz de anticipar suaves maniobras para evitar a personas que están caminado en dirección opuesta o casi paralela al robot. Sin embargo, las mejoras no son muy significativas y los costes sociales aprendidos no capturan todo el conocimiento clave implícito en la navegación social en entornos concurridos. Esto puede indicar que el controlador local utilizado no es capaz de encontrar la mejor acción en estos casos.

Como trabajo futuro, se plantea el grabar un set de datos propio, que recoja una variedad más rica de comportamientos de navegación entre personas y convenciones sociales. Además, se pueden añadir nuevas características a los modelos, tal como las direcciones de los flujos de personas. Por otro lado, se considera el implementar un nuevo planificador local, empleando técnicas como los RRTs [12]. También, se plantea la aplicación de costes sociales a nivel de planificación global de caminos. Finalmente, se planea realizar una evaluación cualitativa de la percepción de los peatones respecto a los diferentes modos de navegación descritos en la sección de experimentos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el VII Programa Marco de la Comisión Europea bajo el acuerdo no. 288235 (FROG) y el proyecto PAIS-MultiRobot financiado por la Junta de Andalucía (TIC-7390).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Pieter Abbeel and Andrew Y. Ng. Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, ICML '04, pages 1–, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[2] B.D. Argali, S. Chernova, M. Veloso, and B. Browning. A survey of robot learning from demonstrations. *Robotics and Autonomous Systems*, 57:469–483, 2009.

[3] K. O. Arras, O. Martinez Mozos, and W. Burgard. Using boosted features for the detection of people in 2d range data. In *Proc. International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2008.

[4] Alexander Carballo, Akihisa Ohya, and Shiníchi Yuta. People detection using range and intensity data from multi-layered laser range finders. In *Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 5849–5854, 2010.

[5] M. Enzweiler and D.M. Gavrila. Integrated pedestrian classification and orientation estimation. In *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008.

[6] B. Gerkey and K. Konolige. Planning and control in unstructured terrain. In *Workshop on Path Planning on Costmaps, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.

[7] Edward T. Hall. *The Hidden Dimension*. Anchor, October 1990.

[8] Peter Henry, Christian Vollmer, Brian Ferris, and Dieter Fox. Learning to navigate through crowded environments. In *ICRA'10*, pages 981–986, 2010.

[9] C. Keller, M. Enzweiler, M. Rohrbach, D.-F. Llorca, C. Schnörr, and D.M. Gavrila. The benefits of dense stereo for pedestrian detection. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 12(4):1096–1106, 2011.

[10] R. Kirby, J. J. Forlizzi, and R. Simmons. Affective social robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 58:322–332, 2010.

[11] Thibault Kruse, Amit Kumar Pandey, Rachid Alami, and Alexandra Kirsch. Human-aware robot navigation: A survey. *Robot. Auton. Syst.*, 61(12):1726–1743, December 2013.

[12] S. M. LaValle and J. J. Kuffner. Randomized kinodynamic planning. *International Journal of Robotics Research*, 20(5):378–400, May 2001.

[13] Sergey Levine, Zoran Popovic, and Vladlen Koltun. Nonlinear inverse reinforcement learning with gaussian processes. In *Neural Information Processing Systems Conference*, 2011.

[14] M. Luber, L. Spinello, J. Silva, and K.O. Arras. Socially-aware robot navigation: A learning approach. In *IROS*, pages 797–803. IEEE, 2012.

[15] Eitan Marder-Eppstein, Eric Berger, Tully Foote, Brian P. Gerkey, and Kurt Konolige. The Office Marathon: Robust Navigation in an Indoor Office Environment. In *International Conference on Robotics and Automation*, 05/2010 2010.

[16] Stefano Pellegrini, Andreas Ess, Konrad Schindler, and Luc van Gool. You'll never walk alone: Modeling social behavior for multi-target tracking. In *International Conference on Computer Vision*, 2009.

[17] R. Ramon-Vigo, N. Perez-Higueras, F. Caballero, and L. Merino. Transferencia de comportamientos de navegación humana a un planificador local de robots. In *XXXV Jornadas de Automática*, 2014. submitted.

[18] Roland Siegwart, Kai O. Arras, Samir Bouabdallah, Daniel Burnier, Gilles Froidevaux, Xavier Greppin, Björn Jensen, Antoine Lorotte, Laetitia Mayor, Mathieu Meisser, Roland Philippsen, Ralph Piguet, Guy Ramel, Gregoire Terrien, and Nicola Tomatis. Robox at Expo.02: A large-scale installation of personal robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(3-4):203–222, March 2003.

[19] Emrah Akin Sisbot, Luis Felipe Marin-Urias, Rachid Alami, and Thierry Siméon. A Human Aware Mobile Robot Motion Planner. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):874–883, 2007.

[20] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, and C. Hahnel. Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva. *The International Journal of Robotics Research*, 19:972–999, October 2000.

[21] Peter Trautman and Andreas Krause. Unfreezing the robot: Navigation in dense, interacting crowds. In *IROS*, pages 797–803. IEEE, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROLADOR RESETEADO DE DESLIZAMIENTO DE RUEDAS PARA SISTEMAS DE FRENADO

Emma Delgado, Antonio Barreiro, Miguel Díaz-Cacho, Pablo Falcón
Escuela de Ingenieros Industriales
Universidad de Vigo
Campus As Lagoas Marcosende, s/n, 36310, Vigo
emmad@uvigo.es, abarreiro@uvigo.es, mcacho@uvigo.es, pfalcon@uvigo.es

Resumen

Para explotar las mayores prestaciones de las nuevas tecnologías en los sistemas de frenado, son necesarios controladores de deslizamiento cuyo objetivo sea mantener, de forma suave e independiente, el grado de deslizamiento de cada rueda con el objetivo de maximizar la adherencia entre el neumático y el suelo, evitando simultáneamente su bloqueo.
Este trabajo consiste en el desarrollo de un controlador reseteado de deslizamiento basado en el modelo simplificado ¼ de vehículo con dinámica longitudinal, para el que la interacción neumático-carretera o curvas de fricción se modela según el modelo de parámetros constantes basado en Pacejka. Es importante indicar que este modelo simple incorpora las principales dificultades de control que aparecen en el sistema de frenado ABS.
La aplicación de controladores reseteados frente a los convencionales permitirá una mejora en las prestaciones del sistema de control de deslizamiento: un transitorio menor y menos oscilante, robustez frente a retardos temporales en la acción de control y frente a cambios en las condiciones de la carretera; que además de una posible reducción en el número de parámetros de diseño del controlador, permite también estimar el coeficiente de fricción neumático-carretera.

Palabras Clave: **control reseteado, PI+CI, sistemas de frenado ABS, control de deslizamiento de rueda, estimación del coeficiente de fricción neumático-carretera**.

1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas de frenado disponibles en el mercado son los sistemas ABS (Antilock Braking System) convencionales, con actuadores hidráulicos (válvulas hidráulicas). Este sistema tiene como objetivo principal evitar el bloqueo de las ruedas en caso de frenada de emergencia, y así, mantener la capacidad de manejar la dirección del vehículo además de disminuir la distancia de frenado, ya que el máximo de fricción entre el neumático y la carretera se alcanza con la rueda en rotación, no bloqueada. La estrategia de control en este caso se basa en medidas de la velocidad angular de las ruedas, y regula de forma indirecta el deslizamiento controlando su aceleración/deceleración.

Para mejorar la flexibilidad, precisión y funcionalidad, los sistemas de frenado de última generación, ver [6], [9], [10] incorporan tecnología electromecánica, que a diferencia de los sistemas convencionales, permite generar y variar de forma continuada fuerzas de frenado independientes para las cuatro ruedas. Con los actuadores electromecánicos, la acción del conductor en el pedal de freno se convierte en señales eléctricas que se transmiten vía microcontroladores a los actuadores de freno. Por tanto, no hay conexión hidráulica entre el pedal y los actuadores, y permite un ajuste continuo y más preciso en la fuerza de frenado. Además, permiten el control directo del deslizamiento en cada rueda mejorando las prestaciones del sistema de frenado y las características de conducción del vehículo, incidiendo en distintos módulos de control de alto nivel tales como el sistema de frenado ABS (antilock braking systems), el control de tracción TC (traction control), el control de estabilidad del vehículo VSC (vehicle stability control), el protocolo de estabilidad electrónica ESP (electronic stability protocol), sistemas de seguridad activos y sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS).

Es en este contexto en el que se inician los trabajos relacionados con los controladores de deslizamiento de alto rendimiento [6], [10], [11], cuyo objetivo es mantener, de forma suave e independiente, un cierto grado de deslizamiento en cada rueda para maximizar la adherencia entre el neumático y el firme en distintas condiciones, evitando simultáneamente su bloqueo.
Investigaciones recientes en este campo estudian el diseño de controladores de deslizamiento basados en control adaptativo, ganancia variable, modos deslizantes, control borroso y compensadores

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

múltiples con acciones proporcional, integral y derivativa (PID's múltiples), entre otras. En general, utilizan varios compensadores para conseguir los objetivos impuestos, lo que dificulta el diseño y la versatilidad. Los distintos compensadores entran en funcionamiento según la velocidad, según el rango de valores del deslizamiento o según las condiciones del firme. Además, en [6] se expone la necesidad de reajustes y mejoras, debido fundamentalmente a las sobreoscilaciones que se presentan en el transitorio con el consiguiente aumento en el tiempo en el que la salida del sistema alcanza el valor de referencia, que se traduce en una mayor distancia de frenado, una actuación brusca, e incluso en situaciones extremas, una pérdida de control del vehículo en situaciones cambiantes del firme o retardo en las comunicaciones entre sensores, controladores y actuadores.

El concepto de controladores reseteados fue planteado originalmente en trabajos aislados que no tuvieron mucha repercusión, realizados por Clegg (integrador de Clegg) en los años 50 [4] y por Horowitz (elemento reseteado de primer orden o FORE) en los años 70 [5]. Se caracterizan por tener elementos no-lineales que pueden aportar mejoras en cuanto a eficacia y rapidez de corrección en la señal de salida. Basan su funcionamiento en la puesta a cero o reset de la salida del controlador, o de la salida de uno de los elementos del controlador, en los instantes de tiempo en los que la señal de entrada al controlador es cero.

En estos trabajos pioneros ya se destacaba el potencial interés de los controladores reseteados como medios para superar limitaciones fundamentales que afectan a numerosas aplicaciones de control automático. No obstante, debido a la falta de desarrollo de las técnicas de estabilidad no lineal que garantizasen la robustez de aquellas propuestas, las ideas fueron abandonadas por varias décadas.
Recientemente, asociado al auge actual de las técnicas de control híbrido, el control basado en reseteo ha recibido un nuevo impulso, apoyado por una metodología ya madura para análisis, diseño y validación de tales controladores [1], [2], [3]. Una propuesta de especial interés práctico es la del compensador PI+CI [2], que combina las ventajas de un compensador estándar como es el proporcional-integral (PI) con la acción complementaria de un integrador de Clegg (CI).

A partir de lo descrito anteriormente, es un objetivo de este trabajo proporcionar un controlador reseteado de deslizamiento de ruedas, versátil y de diseño simple, que simultáneamente presente unas prestaciones mejoradas, es decir, que disminuya la distancia de frenado en distintas condiciones del firme manteniendo en la medida de lo posible unas características adecuadas de conducción del vehículo, y que sea robusto ante las limitaciones tecnológicas tales como incertidumbres, saturación de los actuadores y retardo en las comunicaciones.

El trabajo contempla las siguientes secciones: la Sección 2 establece el planteamiento del problema; la Sección 3 presenta el modelado de la dinámica de frenada; la Sección 4 propone un controlador reseteado de deslizamiento de rueda basado en modelo y un estimador del coeficiente de fricción representativo de las condiciones del firme; la Sección 5 muestra los resultados de las simulaciones, y la Sección 6 resume las conclusiones de este trabajo.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las investigaciones recientes en el campo de control de deslizamiento de ruedas revelan que se trata de un problema de gran dificultad y sometido a limitaciones muy restrictivas, cuya solución eficiente podrá verse favorecida por la aplicación de controladores reseteados.

En concreto y de forma más precisa, el problema de control del deslizamiento (λ) entre neumático y firme de una rueda, puede modelarse, en escalas de tiempo rápidas, como una ecuación diferencial de primer orden, controlada o regulada por la actuación o par de frenado (T_b). Es decir, se tiene una ecuación diferencial: $d\lambda(t)/dt = F(\lambda(t), Tb(t))$, donde $d\lambda(t)/dt$ es la variación del deslizamiento por unidad de tiempo. El problema es que la relación de dependencia dada por la función F es altamente no lineal y sometida a incertidumbre. Ello es debido a que el agarre neumático-firme tiene dos regiones de comportamientos diferenciados: para pequeños deslizamientos, a mayor deslizamiento se tiene mayor fuerza de agarre, lo cual es un efecto beneficioso y estabilizante. Pero, superado cierto umbral, a mayor deslizamiento se debilita la fuerza de agarre. Esto es un fenómeno de pérdida de adherencia que tiene consecuencias catastróficas, y que afecta directamente a la elección de la señal de consigna de deslizamiento óptimo que debe imponerse en el controlador. Los métodos convencionales establecen esta consigna en el valor de deslizamiento donde se obtiene fricción máxima. Además de la fragilidad desde el aspecto de control, esta estrategia se traduce en acciones correctoras bruscas, que dan lugar a vibraciones y unas características no adecuadas de conducción del vehículo. El problema así planteado ya resulta complejo, pero la situación se agrava todavía más si por algún motivo cambian las características del firme. El paso, aunque sea momentáneo, por un firme no adherente, con aceite o hielo, puede provocar que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

el punto de trabajo se desplace a la zona de agarre debilitado, con riesgo de pérdida de control del vehículo. Por todo ello, resulta de vital importancia, además de la elección de la señal de consigna antes comentada, estimar el máximo de fricción que caracteriza a cada tipo o condiciones del firme e incorporar dicha información en el lazo de control [7], [8].

Otro aspecto relevante y complejo [10] de la dinámica del deslizamiento es su escalado con relación a la inversa de la velocidad del vehículo, que produce una dependencia entre la velocidad y el ancho de banda del sistema: a mayor velocidad, menor ancho de banda.

También debe tenerse en cuenta que existe un intervalo de tiempo desde que el controlador calcula la acción correctora en la unidad central de control electrónico, y ésta se transmite por el canal de comunicaciones a cada unidad local de frenado en la rueda. Aparece así en el lazo de control un elemento desestabilizante de retardo. A su vez, la dinámica propia de los actuadores incorpora no linealidades, entre las que cabe destacar la saturación, que limita en la práctica el valor de la acción correctora establecida por el controlador.

Para resolver el problema, este trabajo propone la utilización de un controlador reseteado de deslizamiento de ruedas y un estimador del máximo de fricción que caracteriza a cada tipo o condiciones del firme. Es un método analítico basado en un modelo simplificado del vehículo que incorpora la interacción neumático-firme o curvas de fricción y también las limitaciones tecnológicas tales como la saturación en el actuador y el retardo en las comunicaciones. La definición de un lazo de control que incorpora el controlador reseteado de deslizamiento y los distintos bloques que componen el modelo y el estimador, permite seleccionar, según procedimientos conocidos, los parámetros del controlador reseteado de deslizamiento [2], y del estimador del máximo de fricción [7], [8],.

El controlador reseteado de deslizamiento de cada una de las ruedas se ejecutará en una unidad central de control electrónico, que con medidas de los sensores o estimaciones de ciertas magnitudes implicadas, calculará la actuación (el par de frenado) para cada una de las ruedas y lo transmitirá a través de la red mediante algún protocolo de comunicación a las cuatro unidades locales de control electrónico de freno.

3 MODELADO DINÁMICA DE FRENADO

El diseño de un controlador de deslizamiento se aborda con el llamado modelo de vehículo ¼ detallado en [6], [10], que consta de una sola rueda unida a una masa, en movimiento longitudinal. A medida que la rueda se mueve, impulsada por la inercia de la masa en la dirección de la velocidad, se genera una fuerza de reacción por la fricción entre la superficie del neumático y la superficie del firme. La fuerza de reacción del neumático genera un par que resulta en un movimiento de rotación de la rueda. En estas condiciones, un par de frenado aplicado a la rueda actuará causando una aceleración angular negativa. La fuerza de fricción longitudinal neumático-suelo se modela a partir de la expresión simplificada con coeficientes constantes de Pacejka para movimiento longitudinal. Es adecuada la simplificación basada en movimiento longitudinal porque, según [6], si el deslizamiento longitudinal regulado se mantiene en la zona lineal y estable próximo al valor en el que se obtiene la fricción longitudinal máxima, se alcanza un compromiso razonable entre alta fricción longitudinal y lateral para todas las condiciones del firme.

3.1 MODELO 1/4

Se considera el llamado modelo ¼ que consta de una sola rueda unida a una masa, en movimiento longitudinal. Siendo la velocidad longitudinal de desplazamiento del vehículo v [m/s] y la velocidad angular ω [rad/seg] de la rueda, las ecuaciones son:

$$\begin{aligned} m\dot{v} &= -f_x, \\ J\dot{\omega} &= rf_x - T_b \end{aligned} \tag{1}$$

donde r es el radio efectivo de la rueda, m es ¼ de la masa del vehículo, T_b es el par de frenado (actuación limitada, debido a la limitación tecnológica de saturación en la dinámica de los actuadores) y f_x la fuerza de fricción longitudinal neumático-suelo:

$$f_x = f_z \mu(\lambda_x, \mu_H), \tag{2}$$

$$\lambda_x = \frac{v - r\omega}{v} \tag{3}$$

con f_z la carga normal, μ función normalizada de fricción no lineal, λ_x el deslizamiento longitudinal, μ_H es el valor de máxima fricción entre el neumático y las condiciones del firme. El valor $\lambda_x = 0$ describe el movimiento libre ($\omega = v/r$) y $\lambda_x = 1$ se produce cuando la rueda se bloquea ($\omega = 0$)

3.2 INTERACCIÓN NEUMÁTICO-FIRME

La función $\mu(\cdot)$ para la interacción neumático-firme [7], [8] basada en el modelo de Pacejka para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

movimiento longitudinal se obtiene a partir de la expresión simplificada con coeficientes constantes:

$$f_x = D(\mu_H)\sin\{C\cdot arctg[B\cdot\lambda_x - E(B\cdot\lambda_x - arctg(B\cdot\lambda_x))]\}$$
$$f_x = f_z\mu(\lambda_x,\mu_H) \quad (4)$$

Donde *B, C, D*(μ_H):=D·μ_H, *E* son factores que dependen del tipo de neumático, de la velocidad, de la carga y de las características del firme, siendo el más representativo para el estudio del "agarre" según las condiciones del suelo el llamado factor de pico *D*, que depende de unos valores medios representativos (velocidad 50 km/h) según la Tabla 1.

Tabla 1: Valor medio del factor de pico $D(\mu_H)$:=D·μ_H.

Superficie	μ_H
Asfalto seco	1
Asfalto húmedo	0.7
Gravilla	0.6
Tierra seca	0.68
Tierra húmeda	0.55
Nieve	0.15
Hielo	0.08

En la Fig. 1 se presenta una familia de curvas $\mu(\lambda_x,\mu_H)$ de fricción normalizadas típicas, para distintas condiciones del firme caracterizadas por sus valores de máxima fricción μ_H.

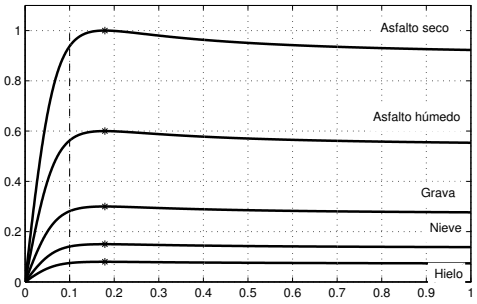


Figura 1: Curvas típicas de fricción

Es adecuada la simplificación basada en movimiento longitudinal porque si el deslizamiento longitudinal regulado se mantiene próximo por la izquierda al valor de deslizamiento (λ_{xH}) en el que se obtiene la fricción longitudinal máxima μ_H, se alcanza un compromiso razonable entre alta fricción longitudinal y lateral para todas las condiciones del firme [6].

Es importante destacar también que en la zona lineal de las curvas (deslizamientos $0<\lambda_x<0.1$) se cumple la aproximación $\mu_H \approx m_i/10$, siendo m_i la pendiente de la curva en la zona lineal.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

El modelo simplificado sobre el que se propone el diseño, se resume finalmente en las ecuaciones siguientes, donde se consideran los valores constantes α=r/J, β=(f_z r^2)/J . Se incorpora también el retardo en las comunicaciones *T* que representa el intervalo de tiempo desde que el controlador calcula la acción correctora en la unidad central de control electrónico, y ésta se transmite por el canal de comunicaciones a cada unidad local de frenado en la rueda:

$$\dot{v} = -\frac{f_z\mu}{m},$$
$$\dot{\lambda}_x = \frac{1}{v}\left(-\beta\cdot\mu + \alpha\cdot T_b(t-T)\right) \quad (5)$$

Este modelo incorpora las principales dificultades de control que aparecen en el sistema de frenado [10]. Con relación a la interacción neumático-firme, localmente, linealizando μ en puntos operativos, se obtienen sistemas de primer orden *G* con retardo, estables o inestables, dependiendo de si la pendiente es positiva (a la izquierda del valor de pico μ_H) o negativa (a la derecha del valor de pico μ_H).

$$\dot{\lambda}_x = \frac{1}{v}\left(-\beta\cdot m_i\lambda_x + \alpha\cdot T_b(t-T)\right) \quad (6)$$

$$G = \frac{\lambda_x(s)}{Tb(s)} = \frac{\alpha\cdot e^{-Ts}}{v\cdot s+\beta\cdot m_i} = \frac{\alpha/v\cdot e^{-Ts}}{s+\frac{\beta\cdot m_i}{v}} = \frac{\alpha/v\cdot e^{-Ts}}{s+p} \quad (7)$$

En segundo lugar, el ancho de banda de los modelos lineales depende de la velocidad: a mayor velocidad, menor ancho de banda:

$$\omega_c = p\sqrt{\frac{2}{pT}-1}, \quad pT\le 0.3 \Rightarrow MF = 45^o \quad (8)$$

Por último, el deslizamiento está escalado por la inversa de la velocidad

4. CONTROLADOR RESETEADO DE DESLIZAMIENTO DE RUEDA Y ESTIMADOR DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El controlador reseteado de deslizamiento implementa una acción de control realimentado sobre el deslizamiento de la rueda λ_x, en el que básicamente, se establece una determinada señal de consigna de deslizamiento óptimo deseado, λ_x^*, que se compara con el deslizamiento actual de la rueda, y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

se calcula mediante un compensador reseteado, una acción correctora *u* en función de esta diferencia, de forma que su término integral se pondrá a cero o a un porcentaje no nulo del valor anterior (acción reset), total o parcialmente, en los instantes de tiempo en los que la diferencia es cero (o en los instantes de tiempo adoptados mediante estrategias anticipativas), e irá ajustando en cada momento el deslizamiento actual hasta aproximarse al valor deseado.

Dentro de los compensadores basados en reseteo, como se explica en [3], existen diversas variantes que se pueden clasificar en función de, primero, la condición de reseteo, es decir, cuándo se aplica el reseteo o reinicio y, segundo, cómo se materializa dicha acción de reseteo.

Con respecto a la condición de reseteo, es decir, cuándo se dispara el evento de reseteo, existen tres planteamientos principales. El primero es el basado en el cruce por cero de la señal de error de seguimiento, es decir, el evento de reseteo se activa justo cuando e(t)=0. El segundo es el basado en la verificación de otras condiciones más generales (pertenencia a un sector cónico) por parte de dicha señal de error, condiciones que toman la forma siguiente F(e(t), de(t)/dt)=0, donde F(x,y) con x=e(t), y=de/dt es una forma cuadrática, por ejemplo F(x,y)=x^2 – y^2. El tercero se basa en activar el reseteo en base a criterios puramente temporales, es decir, en instantes de tiempo t prefijados de antemano, por ejemplo, cada 0,1 segundos. Hay cierta similitud entre los dos primeros enfoques, que son más fieles a las ideas originales de Horowitz y buscan una superación de limitaciones del rendimiento. En otras variantes se sustituye el 0 por una pequeña banda o margen alrededor del 0. Por ejemplo, en vez de e(t)=0 se basan en el evento modificado –δ<e(t)<+ δ, siendo δ un valor pequeño.

Con respecto a la acción de reseteo, es decir, qué acción se aplica sobre las variables del compensador en general o, más en concreto, sobre la integral del error, normalmente la acción de reseteo consiste en poner completamente a 0 dicha variable integral, es decir, reiniciarla a 0. No obstante, para mejorar la precisión estacionaria de los compensadores se puede proponer que, en lugar de resetear la integral del error al valor 0, se resetee a un porcentaje no nulo (por ejemplo al 20% del valor anterior). Por ejemplo, si cuando se activa la condición de reseteo (porque e(t)=0) en ese momento la integral del error vale i(t)=1000, y si se usa un porcentaje de reseteo del 20%, entonces la acción de reseteo consiste en cambiar bruscamente el valor de i(t) desde i(t)=1000 al nuevo valor i(t)=200.

Las variantes posibles de la condición de reseteo y de la acción de reseteo no se limitan a las citadas en los dos párrafos anteriores. Lo que caracteriza a un compensador reseteado es que está basado en un compensador convencional al que se incorpora alguna forma de eventos de reseteo, que dan lugar a alguna forma de acciones de reseteo.

La estructura básica de control reseteado de deslizamiento que se propone es la de la figura Fig.2. Comprende un bloque estimador de μ_H (máxima fricción neumático-firme), un bloque con el modelo ¼ no lineal dado por las ecuaciones (4), (5), un elemento de retardo, un elemento de saturación y un compensador reseteado de deslizamiento.

Se elige como señal de entrada al compensador reseteado la señal de error e = *v**e$_\lambda$, con $e_\lambda = \lambda_x^* - \lambda_x$, y *v* la velocidad en el instante inicial, para simplificar el número de compensadores necesarios debido a la dependencia del deslizamiento con la velocidad. Permitirá con un único compensador reseteado, asegurar ganancias altas a altas velocidades y presentar un buen comportamiento para distintas velocidades con un número mínimo de parámetros de diseño. La señal de salida del compensador reseteado, será la señal de control *u,* cuyo término integral se pondrá a cero o a un porcentaje no nulo del valor anterior (acción reset), total o parcialmente, en los instantes de tiempo en los que la señal de entrada al compensador *e* es cero (o en los instantes de tiempo adoptados mediante estrategias anticipativas).

El compensador reseteado que se propone es el compensador PI+CI según [2], que combina las ventajas de un compensador estándar como es el proporcional-integral (PI) con la acción complementaria de un integrador de Clegg (CI). La descripción matemática de la acción de control *u* es una función de la señal de error *e*:

$$u(t) = K_p e(t) + (1 - p_{reset}) K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + p_{reset} K_i \int_{t_i}^t e(\tau) d\tau$$

Donde K_p and K_i son las ganancias proporcional e integral. El factor p_{reset}, con $0 < p_{reset} < 1$, representa la parte del término integral sobre la que se aplica la acción de reseteo, y se utiliza para conseguir un reseteado parcial del término integral. En el caso de $p_r = 0$, significa que no se ha hecho reset, y por tanto el compensador sería uno convencional P+I, y con $p_r = 1$, significa que se ha hecho un reseteo total, por lo que el compensador actúa como un P+CI.

En cuanto al estimador del máximo de fricción que caracteriza el tipo de firme, se elige un estimador basado en mínimos cuadrados recursivos con factor de olvido [7], [8], que toma los datos de entrada del modelo ¼.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

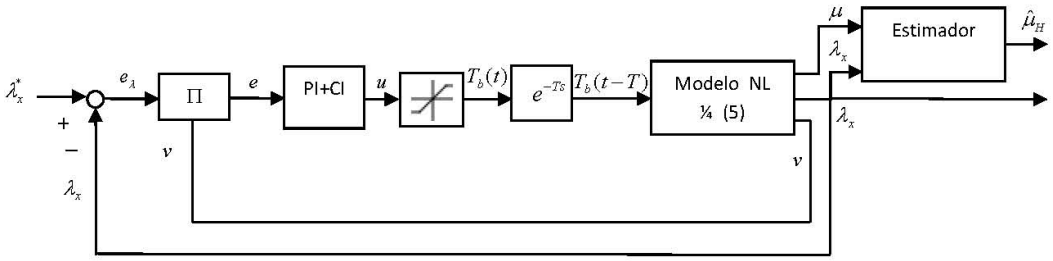


Figura 2: Lazo de control

El cálculo analítico de los parámetros del compensador reseteado PI+CI (ganancia proporcional, ganancia integral, factor de reset) y los parámetros del estimador (longitud del filtro, factor de olvido, valor inicial de la varianza de la estimación) se puede realizar según los procedimientos descritos en la literatura [2], [7], [8].

Como objetivos del sistema de control se encuentran: disminución de la distancia de frenado en distintas condiciones del firme manteniendo en la medida de lo posible unas características adecuadas de conducción del vehículo, y que sea robusto ante las limitaciones tecnológicas tales como incertidumbre, saturación de los actuadores y retardo en las comunicaciones.

Debido a las características comentadas anteriormente relacionadas con las curvas de fricción, un factor clave para la consecución de los objetivos de control y estimación es la elección de la señal de consigna λ_x^* de deslizamiento óptimo en el sistema de control. Ésta debe establecerse próxima al límite de la zona lineal estable, que se encuentra a la izquierda del valor de máxima fricción (ver Fig. 1). Este valor permite trabajar en unas condiciones de adherencia alta en la zona lineal y estable, donde se cumple que $\mu_i(\lambda_x) = m_i \cdot \lambda_x$, y el valor que representa la máxima fricción o adherencia con el firme puede aproximarse por $\mu_H \approx m_i/10$, característica que es utilizada para la estimación de dicho valor.

Puede verse en Fig.3 y Fig.4 cómo afecta la elección de la consigna de deslizamiento tanto al seguimiento de la señal de consigna como a la acción de control. Las figuras representan una situación de frenada sobre un firme seco con un controlador reseteado de deslizamiento. Establecer la señal de consigna óptima como el valor del deslizamiento donde se obtiene el máximo de fricción como en los métodos convencionales, conlleva un mal seguimiento de la señal (muchas oscilaciones) que empeora las prestaciones del sistema de control y una actuación brusca no deseable.

Realizada una adecuada selección en el valor de la consigna de deslizamiento, la utilización de un controlador reseteado de deslizamiento, caracterizado por tener elementos no-lineales que aportan mejoras en cuanto a eficacia y rapidez de corrección en la señal de salida, permite una mejora en las prestaciones del sistema y robustez.

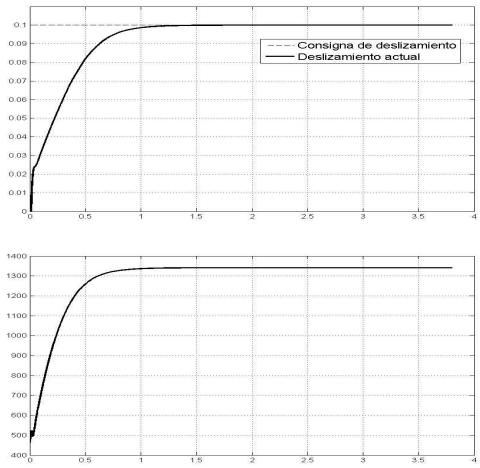


Figura 3: Consigna de deslizamiento óptimo próxima al límite de la zona lineal estable.
a) Seguimiento de consigna. b) Actuación T_b

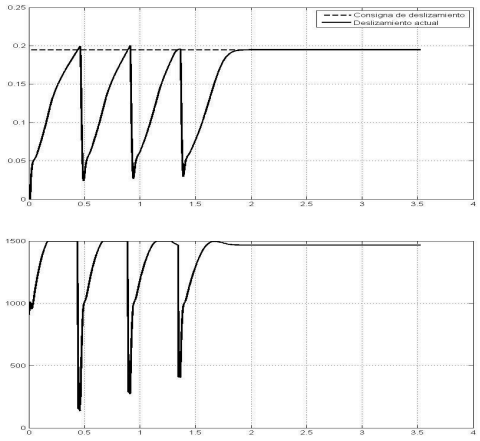


Figura 4: Consigna de deslizamiento óptimo igual al deslizamiento correspondiente al máximo de fricción.
a) Seguimiento de consigna. b) Actuación T_b

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

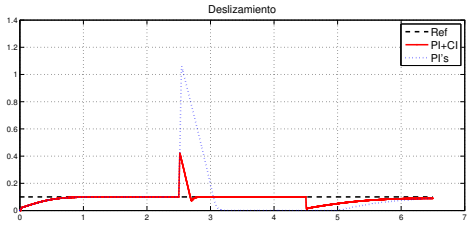
5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para exponer las ventajas del controlador propuesto frente a los convencionales, se realizarán simulaciones de dos sistemas de control con el mismo modelo ¼ y en las mismas condiciones de valor de consigna, firme, velocidad, saturación y retardo. Los sistemas difieren en el controlador de deslizamiento. En un caso se corresponde a un controlador convencional [10] formado por dos compensadores PI con distintas ganancias proporcionales e integrales (K_{p1}=130, K_{I1}=1.43·10^3 para $\lambda_x \leq 0.1$, y K_{p2}=1300, K_{I2}=13·10^3 para $\lambda_x > 0.1$), que actúan en función de si el valor de deslizamiento actual es inferior o superior a un determinado umbral, y en el segundo, el controlador basado en un compensador PI+CI (K_p=130, K_I=1.43·10^3, p_r=0.9). Los valores utilizados en las simulaciones se resumen en la tabla 2.

Tabla 2: Valores modelo simulación.

Constantes	Valor
m	433.75
r	0.3216
J	1.5
T_{bmax}	1500
alfa	0.2144
beta	293.4839
B	10.96
C	1.3
D	4560.4
E	-0.5

En la Fig. 5 se presenta una situación de frenada sobre un firme con distintas condiciones de adherencia (asfalto seco, hielo, asfalto húmedo). El retardo en la actuación es de 15 mseg. Se impone una consigna de deslizamiento óptimo en el límite de la zona lineal estable. El control se realiza con un porcentaje de reset igual a 0.9. La primera figura representa la respuesta de los sistemas ante la entrada de consigna de deslizamiento aplicada. La segunda muestra los resultados de la estimación del máximo de fricción que caracteriza cada tipo de firme. La tercera muestra la actuación, y la cuarta la disminución de la velocidad, en ambos casos.



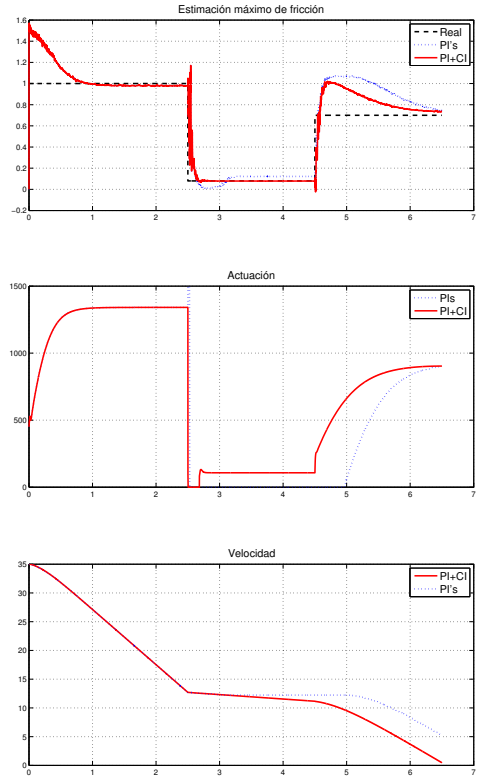


Figura 5: Comparación controlador reseteado y convencional (dos PI).
a) Seguimiento de consigna. b) Estimación del máximo de fricción. c) Actuación T_b. d) Velocidad

Como se observa en las simulaciones, la aplicación de controladores reseteados frente a los convencionales permite una mejora en las prestaciones del sistema de control de deslizamiento.

6. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido proporcionar un controlador de deslizamiento de ruedas, versátil y de diseño simple, que simultáneamente presente unas prestaciones mejoradas: un transitorio menor y menos oscilante, robustez frente a retardos temporales en la acción de control y frente a cambios en las condiciones del firme. Esta mejora se traduce principalmente en una disminución de la distancia de frenado, y una estimación más precisa del coeficiente de fricción neumático-firme.

Este objetivo se consigue con un controlador reseteado de deslizamiento que permite superar los trade-offs u objetivos comprometidos: con los controladores convencionales si se quiere una respuesta de frenado rápida, el sistema resulta frágil y sensible a incertidumbres; y si se quiere un sistema robusto, ello exige acciones de frenado más lentas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La propuesta que se plantea consigue, simultáneamente y en la medida de lo posible, mejorar tanto la rapidez de frenado como la robustez frente a condiciones imprevistas. Además, para simplificar el diseño, se proporciona un método basado en modelo. para el diseño del compensador y del estimador.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCINN, España proyecto DPI10-20466-C02-C01.

Referencias

[1] A. Baños, A. Barreiro, (2012), Reset Control Systems (Advances in Industrial Control), Springer, Edición 2012.

[2] Baños A., Vidal A., (2007), Definition and tuning of a PI+CI reset controller, Proc. European Control Conference, Greece.

[3] Barreiro A. and Baños A., (2012), Sistemas de Control basados en Reset, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9, 2012 pp. 329346, (2012).

[4] Clegg J.C., (1958) A nonlinear integrator for servomechanisms, Transactions A.I.E.E.M., Part II, pp.41-42.

[5] Horowitz I. and Rosenbaum M., (1975), Nonlinear design for cost of feedback reduction in systems with large parameter uncertainty, *International Journal of Control*, 24, 6, pp.977-1001, 1975.

[6] T. A. Johansen, I. Petersen, J. Kalkkhul and J. Lüdemann, (2003), Gain-Scheduled wheel slip control in automotive brake systems, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, vol.11, nº 6 .

[7] C. Lee, K. Hedrick and K. Yi, (2004), Real-Time Slip-Based Estimation of Maximum Tire-Road Friction Coefficient, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS , vol. 9,Nº 2, June 2004.

[8] R. Rajamani, G. Phanomchoeng, D. Piyabongkarn, and J. Y. Lew., (2011), Algorithms for Real-Time Estimation of Individual Wheel Tire-Road Friction Coefficients, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS (2011), Digital Object Identifier 10.1109/TMECH.2011.2159240.

[9] Soliman, A. and Kaldas, M., (2012), An Investigation of Anti-lock Braking System for Automobiles, SAE Technical Paper, doi:10.4271/2012-01-0209.

[10] S. Solyom, (2002), Synthesis of a Model-based Tire Slip Controller, LICENTIATE THESIS, June 2002, Supervisors: Anders Rantzer, Björn Wittenmark, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

[11] Zhu, H., Yu, Z., Xiong, L., and Zheng, H., (2013), An Anti-Lock Braking Control Strategy for 4WD Electric Vehicle Based on Variable Structure Control, SAE Technical Paper, doi:10.4271/2013-01-0717.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

GENERACIÓN Y REPRODUCCIÓN DE SOMBRAS EN TIEMPO REAL EN EASY JAVA SIMULATIONS

Francisco J. García, Carlos A. Jara, Francisco A. Candelas, Fernando Torres
Universidad de Alicante
fco_jav_gar@hotmail.com, carlos.jara@ua.es, francisco.candelas@ua.es, fernando.torres@ua.es

Francisco Esquembre
Universidad de Murcia
fem@um.es

Resumen

Este artículo presenta el resultado de la generación de sombras en tiempo real a la aplicación Easy Java Simulations (Ejs). Ejs es una herramienta open-source elaborada en Java para la creación de laboratorios virtuales interactivos. Ejs está completamente implementado en Java, y la parte gráfica se ha desarrollado utilizando la librería de gráficos Java3D. Por lo tanto, se ha realizado una técnica de sombreado compatible que se pueda implementar con las restricciones que impone dicha librería.

Palabras Clave: Java3D, Stencil Buffer, Vertex Shader, Volumen de sombras.

1 INTRODUCCIÓN

Ejs es una herramienta open-source elaborada en Java para la creación de laboratorios virtuales interactivos [1-3]. Dicha herramienta está implementada en java, y la parte gráfica utilizando la librería de gráficos Java3D. Ejs carece de representación de sombras en sus vistas 3D. Dado que las sombras ayudan mucho a conseguir simulaciones más realistas y naturales de ver, se inició este trabajo con la potente herramienta Ejs. De esta manera, se consigue más realismo en las simulaciones, que hacen sentir al usuario que está trabajando con un equipo real. Esto es así no solo en los ámbitos de juegos o multimedia, sino que grandes marcas de equipos automatización y robótica están incluyendo interfaces más sofisticadas en aplicaciones de desarrollo (SCADA, simulación procesos, simulación y programación de robots, etc.) Con el tipo de mejoras como el 3D y las sombras en Ejs se puede mostrar interfaces al nivel de aplicaciones profesionales.

Por lo tanto, para la implementación de sombras en tiempo real se tuvo que tener en cuenta las restricciones impuestas por Java3D y se empleó utilizar una técnica de sombreado compatible con las funciones que proporciona dicha librería.

Java3D está basado en la representación de la escena como un árbol de figuras. La escena se compone de nodos, que se van insertando en el árbol, para que posteriormente Java3D se encargue de su renderizado al recorrerlo. A bajo nivel, Java3D utiliza OpenGL o DirectX para renderizar la escena, pero en este caso caso necesitaremos que se ejecute sobre OpenGL porque los *shaders* de DirectX (HLSL) no están soportados.

Por otro lado, la intención es que se generen las sombras para cualquier escena, sin conocimiento previo de los objetos de ésta, lo que implica que se debe utilizar un método que genere las sombras a partir de la geometría. El método escogido para el proyecto fue el de generación de sombras por volúmenes de sombra.

Para una exposición clara del contenido del artículo, éste se ha organizado de la forma siguiente. A continuación, se describen una serie de términos necesarios para la compresión correcta del artículo. Posteriormente, en la sección 3, se explica el algoritmo de generación de volúmenes de sombra. A continuación, se describe cómo se obtiene la geometría de la escena y cómo se generan los volúmenes. En la sección 6, se explica cómo se realiza la extrusión de los volúmenes de sombra y en la sección 7, cómo se visualizan en la escena. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos.

2 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS PREVIOS

Esta sección muestra la definición de una serie de términos necesarios para la compresión del artículo.

- *Set*: Un *set* es una colección de Java que tiene la propiedad de que no admite elementos repetidos. Para saber si 2 elementos son el mismo se utiliza

el método *equals*. Si se añade un elemento repetido, el segundo sustituirá al primero.

- *HashSet*: un *hashSet* es una implementación del *Set* en java, que se basa en una función de dispersión. Java proporciona esto mediante el método *hashCode*, presente en todas las clases. La búsqueda de elementos en el *hashSet* es extremadamente eficiente si la función de dispersión es adecuada.

- *Raster:* es el buffer donde se guarda la información de color, que se enviará al monitor para representarlo. También se llama buffer de color.

- Buffer de profundidad, o *Z-buffer*: es un buffer del mismo tamaño que el *raster* en el que se guarda la profundidad de los objetos para cada píxel. Normalmente se utiliza para sobrescribir un píxel si la profundidad es mejor (más cerca de la pantalla), de modo que los objetos más alejados no sobrescriban a los más cercanos si se dibujan después. Este funcionamiento se puede invertir, generalmente para usarse junto al *stencil buffer*.

- *Stencil buffer*: es un buffer del mismo tamaño que el *raster* y el *z-buffer*. El *stencil buffer* se controla mediante una serie de operaciones y una función. Cada operación decide qué hacer cuando se escribe en el *stencil buffer*, puede ser incrementar, disminuir, mantener, establecer a 0, etc. La primera operación se aplica cuando la función del *stencil buffer* falla, la segunda cuando la función del *stencil* es correcta, pero el *z-buffer* falla, y la tercera cuando ambas son correctas. La función recibe 3 parámetros: el tipo de comparación, un valor, y una máscara. El tipo de comparación establece la operación que se realizará sobre el *stencil buffer* para determinar si el test pasa o no. Puede ser siempre, nunca, mayor, menor, etc. Para aplicar esta operación se usa el valor del segundo parámetro, y el valor actual del *stencil buffer* aplicándole la máscara del tercer parámetro. Si la función del *stencil* falla, además de aplicarse la primera operación, se desactiva la escritura en el *raster*.

- *Culling*: el *culling* es una operación de la tarjeta gráfica que se basa en no mostrar los polígonos que cuya cara está en contra de la cámara, o hacia la cámara. Normalmente se suele utilizar el *culling* de las caras traseras por motivos de rendimiento, ya que se puede evitar el renderizado de la mitad de la escena. La tarjeta gráfica utiliza los vértices de la cara para determinar su dirección, y espera que estén definidos en sentido anti horario. Si el *culling* está activado, y los vértices no están definidos correctamente según el estándar, se cortarán caras que deberían mostrarse, y se mostrarán caras que deberían estar ocultas.

- *Vertex shader*: un *vertex shader* es una función que se ejecuta en la tarjeta gráfica una vez por cada vértice que se renderiza. El *vertex shader* puede realizar cambios en la posición del vértice, y puede calcular datos que se utilizarán en pasos posteriores del renderizado del vértice, mediante el uso de píxel *shaders*.

3 ALGORITMO DE VOLÚMNES DE SOMBRA

El algoritmo de generación de volúmenes de sombra se basa en generar una geometría especial a partir de las figuras de la escena, que no se mostrará en pantalla, si no que se utilizará para marcar las zonas de la pantalla que deberán estar iluminadas o ensombrecidas. Esta geometría especial se denomina volumen de sombra, y son el resultado de realizar una extrusión de la silueta de las figuras de la escena de la luz hacia el infinito. En la figura 1 se puede ver un ejemplo de un volumen de sombra renderizado en modo alámbrico, generado por un plano.

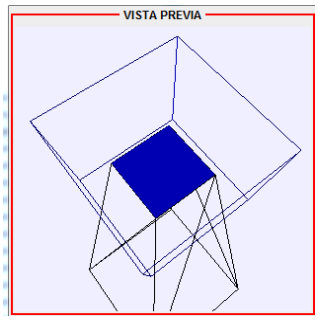


Figura 1: Plano generando un volumen de sombra.

Los objetos que se encuentran dentro del volumen de sombra se mostrarán oscurecidos, mientras que el resto estarán iluminados. El algoritmo de generación de sombras se compone de 5 pasos, que se deben ejecutar para cada luz de la escena:

- El primer paso es recorrer la geometría de la escena para obtener la silueta de cada figura en función de la luz, así como los polígonos que apuntan hacia la luz, y los que están en contra de la luz. La silueta de la figura es el conjunto de aristas que separan una cara cuya normal apunta hacia la luz y otra cuya normal está en contra de la luz. La normal que se utiliza para el cálculo de sombras es siempre la normal geométrica del polígono, no la normal que se utiliza en *openGL* para el cálculo del color del píxel, que no tiene por qué coincidir (por ejemplo en un cono sería diferente para darle un aspecto redondeado). Para

saber si una cara está hacia la luz o contra luz se obtiene el vector que va desde la cara hasta la luz, y se calcula el producto escalar del vector de luz con la normal de la cara. Las caras que están a contra luz se guardan para generar las tapas de los volúmenes de sombra, y las aristas de la cara las introducimos en una tabla tipo *hashSet*, si aún no estaba, y se eliminan del *set* si ya existía. Con esto conseguimos que en el *set* se queden únicamente las aristas de la silueta. Este paso se explica con más profundidad en la sección 4.

- El segundo paso es generar los volúmenes de sombra, que tiene dos partes, las tapas y las caras. Las caras están formadas por 4 vértices. Los 2 primeros vértices son los vértices de cada una de las aristas de la silueta que hemos extraído en el paso anterior. Los otros 2 vértices son la extrusión de los 2 primeros desde la luz hasta el infinito. En *OpenGL* el infinito se representa utilizando coordenadas homogéneas, con un 0 en la última coordenada. Java3D no soporta coordenadas homogéneas, pero se puede sortear esta limitación utilizando un *vertex shader*, como se explicará más adelante. La otra alternativa es desplazar los vértices una cantidad determinada en lugar de al infinito, pero además de ser menos eficiente que usar un *vertex shader*, se generarían artefactos en la escena si situamos un objeto detrás del límite del volumen de sombra. Las tapas son simplemente la extrusión de todos los vértices de las caras a contra luz hacia el infinito, utilizando un *shader* al igual que para las caras. Véase la sección 5 para más detalles.

- El tercer paso es *renderizar* la escena con todas las luces apagadas excepto las luces ambientales. Esto renderizará la escena a oscuras, como si todo fuera una sombra.

- El cuarto paso es renderizar los volúmenes de sombra, con lo que prepararemos el *stencil buffer* para poder dibujar las sombras. Se desactiva la escritura en el en el *Z buffer* y en el *raster*, se activa la escritura en el *stencil buffer*, con la operación de incrementar una unidad activada y el *culling* de las caras frontales. Con esta configuración dibujamos los volúmenes de sombra. A continuación se pone el *stencil buffer* con la operación de disminuir, y el *culling* de las caras traseras. Se vuelve a dibujar los volúmenes de sombra. Con esta operación se consigue que en el *stencil buffer* halla 0 para los píxeles que no están sombreados, y otro número para los que sí lo están. Estas operaciones están detalladas en las secciones 6 y 7.

- En el último paso, activamos la luz actual (con la que se ha generado los volúmenes de sombra), se vuelve a activar el *Z buffer* y la escritura en el *raster*, y se vuelve a renderizar la escena, activando el dibujado para los píxeles donde el *stencil buffer* esté a 0, y activando el modo de mezcla (*blending*). De esta manera, se dibujan las figuras iluminadas por la luz únicamente para los píxeles que no hemos marcado con los volúmenes de sombra.

4 OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESCENA

Java3D organiza la escena en forma de árbol. El árbol tiene varios tipos de nodo, en nuestro caso nos interesan los grupos y las hojas.

Los grupos son nodos que contienen nodos hijos. Además hay un subtipo de grupo, implementado por la clase *TransformGroup*, que aplica una transformación a sus nodos hijos. Para obtener la geometría de la escena se debe recorrer estos nodos, y acumular en una matriz de transformación las distintas transformaciones de los *TransformGroup* para poder convertir las coordenadas de los objetos al espacio de coordenadas de la escena, de modo que las luces y los objetos estén en el mismo espacio. Las hojas contienen la geometría de los objetos, pero también tenemos hojas que almacenan otra información, por ejemplo, las luces.

En nuestro caso, la organización de la escena es algo diferente. Ejs contiene una clase *Element*, que contiene la información de cada elemento de la escena, y que es heredada para implementar cada tipo de elemento (por ejemplo *ElementPlane*, o *ElementSphere*). El *Element* contiene un objeto *ImplementingObject*, que se instanciará en función de la implementación escogida para la escena (Simple3D, que dibuja la escena en modo *raster*, o Java3D, que es la que interesa). Se debe considerar también la clase *ElementGroup*, que sirve para agrupar distintos elementos. Cada elemento define una transformación, que se traducirá en un *TransformGroup* en el *ImplementingObject*, de modo que para extraer la información geométrica de la escena, se debe recorrer los grupos, obteniendo la información de transformación de los *TransformGroup* internos, para finalmente acceder a las hojas.

Java3D implementa varios tipos de geometrías [4]. La geometría *QuadArray* define cuadrados utilizando vértices de 4 en 4. La geometría *TriangleArray* define triángulos usando vértices de 3 en 3. La geometría *TriangleFanArray* define varios "abanicos". En cada uno de ellos, el primer punto define el punto central, y cada punto adicional genera un triángulo formado por el vértice central, el vértice

anterior y el vértice actual. Podemos ver un ejemplo en la figura 2.

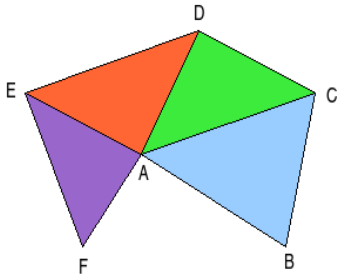


Figura 2: Triangle Fan de 4 triángulos definido por 6 vértices

La geometría *TriangleStripArray* define los triángulos utilizando la información de los 3 últimos vértices leídos, de modo que si definimos el *strip* A,B,C,D, tendremos el triángulo A,B,C, y el triángulo D,C,B. Es importante considerar que los triángulos definen los vértices en sentido contrario, de otro modo se obtendría esos triángulos en sentido horario, en lugar de sentido anti horario, que es un requisito indispensable para generar correctamente las sombras. A continuación, se puede ver un ejemplo en la figura 3.

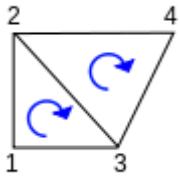


Figura 3: Triangle Strip de 2 triángulos definido por 4 vértices

5 GENERACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SOMBRA

En el apartado anterior se veía cómo obtener los polígonos que formaban cada una de las figuras de la escena. Para cada polígono extraído de la geometría, se debe obtener la normal de dicho polígono. Se tiene que usar la normal geométrica, obtenida mediante los vértices, y no la normal almacenada en la figura, que se utiliza en el renderizado. Por eso es importante que todas las figuras estén definidas con los polígonos en sentido anti horario, como marca el estándar. De otra manera se generarían artefactos en la generación de sombras, además de otros posibles artefactos en el renderizado, especialmente si está el *culling* activado. Utilizando esa normal y la posición de la luz, calculamos si el polígono está hacia la luz o contra luz. Si la cara está a contra luz nos guardamos sus vértices para añadirlos a la geometría que contiene las tapas, y además guardamos cada arista en el *Set* de aristas, si no existía, y lo eliminamos en caso contrario. Una vez hemos hecho esto, ya podemos generar la geometría del volumen de sombra. Las tapas se generan con los vértices guardados para las tapas, extruidos hacia el infinito.

Las caras se generan utilizando los vértices de la silueta, y estarán formados por los 2 vértices de la arista, y los 2 mismos vértices con una extrusión hacia el infinito. La extrusión, se realizará mediante el uso de un *vertex shader*. La geometría de las sombras se guarda en un *BranchGroup*, que se recorre al renderizarla.

6 APLICACIÓN DEL ALGORITMO Y USO DE LOS RENDERING ATTRIBUTES

Para realizar el renderizado de las sombras, necesitamos controlar el *stencil buffer*, el dibujado en el *buffer* de color y de profundidad, y el *culling*.

En Java3D esto se consigue mediante el uso de la clase *RenderingAttributes*, que es parte de la apariencia de las primitivas. Recordando el algoritmo, se debe renderizar los volúmenes de sombra 2 veces, ambas con la escritura en el *buffer* de color y de profundidad desactivada. En la primera se activa el *culling* de las caras frontales, y se activa el *stencil buffer* con la operación de incrementar. En la segunda se activa el *culling* de las caras traseras, y se cambia la operación del *stencil buffer* a disminuir. Para conseguir esto, se generan 2 objetos de tipo *Appearence*, que se le asignarán a los volúmenes de sombra a la hora de renderizarlos.

Para configurar la apariencia, en primer lugar se crea un objeto de tipo *RenderingAttributes,* y a continuación se le asigna las capacidades de lectura y escritura en el *stencil buffer*. Se desactiva la escritura en el *Z-buffer*, y se establece el test de profundidad a LESS, dando prioridad a los más alejados y se desactiva la escritura en el *raster*. Finalmente, se activa el *stencil buffer*, y se establece la función para que el test pase siempre. En la primera apariencia, se asigna la operación del *stencil* para que se incremente cuando el test del *Z-buffer* pasa. Se mantiene el valor del *stencil* para los otros 2 casos.

En la segunda apariencia, se cambia la operación para que se disminuya. Una vez hecho esto, queda activar el *culling*. Esto se hace añadiendo un objeto de tipo *PolygonAttributes* a la apariencia. En la primera apariencia activaremos el *culling* de las caras traseras. En la segunda apariencia activaremos el *culling* de las caras delanteras. Para que se apliquen estas opciones asignamos los atributos a la apariencia.

Por último, se debe generar una apariencia más para el renderizado de la escena propiamente dicha. Se debe activar la escritura en el *buffer* de profundidad y en el *buffer* de color. La función del test de profundidad hay que asignarla a *LESS_OR_EQUAL*, puesto que se desea dibujar cada figura varias veces para añadirle la luminosidad de cada luz, que no esté en un volumen de sombras. Se activa también el *stencil buffer*, pero se deshabilita la escritura con todas las operaciones, y se establece la función *equals*, usando el valor de referencia 0. Con esto se consigue que se dibuje en los píxeles que hemos dejado a 0 en el paso anterior.

7 EXTRUSIÓN DE LOS VOLÚMENES DE SOMBRA, SHADERS EN JAVA3D

Como se ha comentado anteriormente, la extrusión de los vértices hacia el infinito se realizará mediante el uso de un *vertex shader*. Para utilizar un *Shader* en Java3D, primero deberemos generar un objeto de tipo *GLSLShaderProgram*, cargar el *shader*, y asignárselo a la apariencia del objeto sobre el que queremos que se aplique. En nuestro caso lo asignaremos a las apariencias de los volúmenes de sombra. Para cargar el *shader* debemos pasarle el código en un *String* a un objeto de tipo *SourceCodeShader*.

En el *vertex shader* se necesitan 3 datos: el vértice actual, que nos lo proporciona OpenGL automáticamente dentro del *shader* con la variable *gl_Vertex*, la posición de la luz que es común a toda la escena, y la cuarta coordenada del vértice, que varía según el vértice (recordemos que Java3D no soporta coordenadas homogéneas). Java3D nos ofrece dos formas de pasar variables al *vertex shader*. La primera forma sirve para pasar constantes, que es nuestro caso para la posición de la luz. En el código del *shader* se define la constante con el modificador *uniform*. Informamos al *shader* del nombre del *shader attribute,* mediante el método *setShaderAttrNames.* Se crea un objeto *ShaderAttributeSet*, y se lo asignaremos a cada una de las apariencias para los volúmenes de sombra. En cada iteración, para renderizar los volúmenes de sombra, estableceremos en el *attributeSet* la posición de la luz, pasándole un *ShaderAttributeValue* con el nombre "light", y el vector con la posición de la luz.

La segunda forma de pasar variable al *vertex shader* sirve para pasarle información adicional para cada vértice. En el código del *shader* se define utilizando el modificador *attribute*. Informamos al *shader* del nombre de la variable que contendrá nuestros *Vertex Attributes*, mediante el método *setVertexAttrNames.*

Los *VertexAttribute* son objetos que se incluyen dentro de los objetos *Geometry* (como los Vértices). Cada vértice puede tener N vértices *attributes*, pero en nuestro caso sólo utilizaremos 1, el valor de la cuarta coordenada, que será 1 para los casos en los que no se necesita extruir el vértice, y 0 cuando se ejecuta una extrusión hacia el infinito. Debemos darle la capacidad de los *VertexAttributes* a las geometrías de los volúmenes de sombra al inicializarlas. Los *VertexAttribute* se inicial al mismo tiempo que las coordenadas, mediante el método *setVertexAttr.* Pasaremos el valor 0 para los vértices que queremos en el infinito, y el valor 1 para el *resto.*

Una vez hecho esto, sólo queda por ver el *vertex shader,* donde se aplica la ecuación 1 para los vértices marcados para que se les realice la extrusión hacia el infinito:

$$\text{position} = MVPM\ \left(float(Vertex_{xyz} light_w - light_{xyz}, 0.0)\right) \quad (1)$$

, donde *MVPM* es la variable *gl_ModelViewProjectionMatrix,* que GLSL [5,6] pasa automáticamente como parámetro, y *position* es el valor final que devolverá el *shader*.

Con esto, queda una última consideración. La matriz de transformación definida por *Java3D* recorta los objetos a partir de cierta profundidad, pero se necesita que se rendericen vértices que están en el infinito. Eso significa que hay que cambiar la matriz de proyección por la que se define en la ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} \frac{2\cdot near}{right-left} & 0 & \frac{right+left}{right-left}t & 0 \\ 0 & \frac{2near}{top-bottom} & \frac{top+bottom}{top-bottom} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2\cdot near \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

8 CONTROL DEL ÓRDEN DE RENDERIZACIÓN, MODO INMEDIATO

Java3D tiene 3 modos de renderizado: el modo retenido, el modo inmediato, y el modo mixto [7].

En el modo retenido, que es el que utiliza Java3D por defecto, Java3D se encarga de renderizar la escena recorriendo el grafo de la escena. En este modo Java3D recorre la escena buscando encontrar la máxima eficiencia, y el programador no puede controlar este orden. Esto implica que este modo no es adecuado para el renderizado de sombras en absoluto, ya que Java3D podría decidir, por ejemplo, dibujar primero los volúmenes de sombra, luego seguir por la escena. Además necesitamos activar o

desactivar las luces en función del estado actual de la renderización, y renderizar la escena varias veces, lo cual no es fácil de hacer en modo retenido.

En el modo mixto se hace lo mismo que en el modo inmediato, pero además se le ofrece al programador unas funciones que se ejecutan antes y después del renderizado de la escena, y que sirven para realizar operaciones adicionales, como añadir un *overlay*, o realizar una captura.

En nuestro caso, el modo que interesa es el modo inmediato, en el que se nos ofrece el control total del orden de renderización. Esto implica que se necesita controlar el apilado y desapilado de la matriz de transformación, y el dibujado en sí de las figuras. Para ello disponemos del objeto *GraphicsContext3D*, que se obtiene del *Canvas3D*. Al recorrer el árbol de la escena podemos encontrarnos con 3 casos. El primer caso es encontrarnos con un grupo. En este caso simplemente se dibuja recursivamente a sus nodos hijos.

El segundo caso es un grupo de transformación. En este caso se debe guardar la matriz de transformación actual, aplicar la matriz de transformación, renderizar los nodos hijos, y finalmente restaurar la matriz de transformación original.

Finalmente, el tercer caso es uno nodo de tipo *Shape3D*, es decir, un nodo hoja. En este caso dibujaremos el nodo llamando al método "*draw*()" del contexto.

9 RESULTADOS

Se han hecho varias pruebas para comprobar la correcta visualización de las sombras que se ha implementación en una versión previa de Ejs. En las primeras pruebas se comprobó que la extrusión de los vértices y los volúmenes de sombra eran correctos, activando la visualización en modo alámbrico de los volúmenes de sombra, como se aprecia en la figura 4.

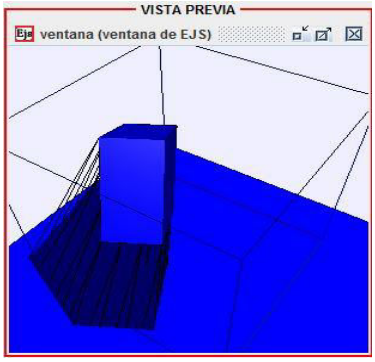


Figura 4: Renderización de un cubo con los volúmenes de sombra renderizados en alámbrico.

Otra prueba importante era comprobar el desempeño del algoritmo cuando hay varias fuentes de luz en la escena, como se puede ver en las figuras 5 y 6.

Finalmente, se comprobó también el correcto funcionamiento al utilizar la opción de agrupar figuras en Ejs (véase figura 7).

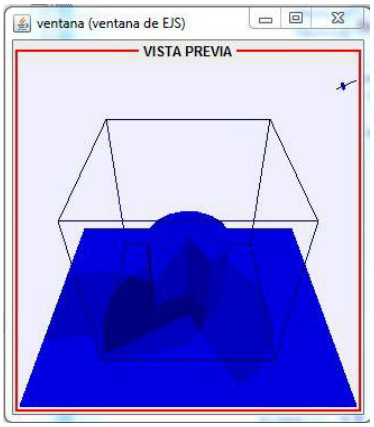


Figura 5: Cilindro con 2 luces activadas en la escena

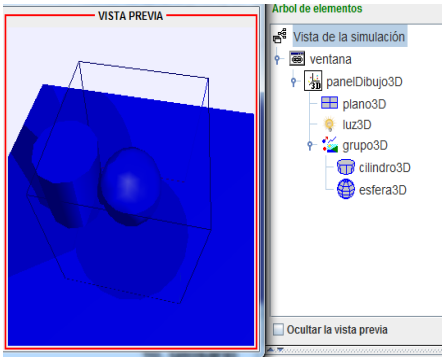


Figura 6: Escena con un cilindro y un cono, con una intersección entre las sombras de ambos.

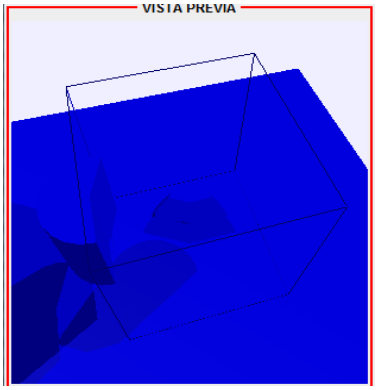


Figura 7: Escena con un grupo de figuras.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y los fondos Europeos FEDER (DPI2012-32390), la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2013/085) y la Universidad de Alicante (GRE12-17).

Referencias

[1] Christian, W. y Belloni, M., (2003). Developing open source programs for science and mathematics. EUROCON 2003.

[2] Dormido, S., Farias, G., Sanchez, J. y Esquembre, F., (2005). Adding interactivity to existing Simulink models using Easy Java Simulations. 44th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 2, pp 4163-4168.

[3] Esquembre, F., (2004). Easy Java Simulations: a software tool to create scientific simulations in Java. Computer Physics Communications, vol. 156, pp 199-204.

[4] Joan J. Partdepadua, (2003) Programación en 3D con Java3D. RA-MA editorial.

[5] GLSL: An introduction. Página web: http://nehe.gamedev.net/article/glsl_an_introduction/25007/

[6] GLSL tutorial. Página web: http://www.opengl.org/sdk/docs/tutorials/ClockworkCoders/loading.php

[7] Immediate-Mode Rendering. Página web: http://download.java.net/media/java3d/javadoc/1.4.0/javax/media/j3d/doc-files/Immediate.html

Planificación de rutas para la cobertura de un área en tiempo mínimo mediante un sistema Multi-UAV

Ernesto Santana Cruz
Romualdo Moreno Ortiz
Miquel Àngel Piera Eroles

Dpto. de Telecomunicación e Ingeniería de Sistemas,
Universidad Autónoma de Barcelona, España

Email: ernestoemmanuel.santana@uab.cat

Resumen

Los Sistemas Multi-UAV representan una excelente solución para llevar a cabo misiones que tienen como principal objetivo realizar la cobertura de extensas áreas exteriores. En este artículo proponemos un método que permite cubrir el área objetivo minimizando el tiempo de la misión. Para lograrlo se divide el área en varias subregiones tomando en cuenta el tiempo de autonomía de cada UAV y la ubicación de la estación base de lanzamiento.

Palabras Clave: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Coverage Path Planning (CPP); Polygon decomposition

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha evidenciado un notable crecimiento del empleo de Sistemas Multi-UAV (Unmanned Aerial Vehicles) en aplicaciones civiles, debido a que estos permiten elevar sustancialmente el grado de eficiencia y seguridad a la hora de realizar misiones relativamente complejas. Una de las misiones que se enmarca en la mayoría de las aplicaciones civiles es la de cobertura de un área determinada. Esta misión tiene como objetivo realizar una planificación de ruta que permita cubrir toda el área en el menor tiempo posible.

En la referencia [4] los autores presentan una solución para cubrir un área objetivo con un único UAV. En dicho trabajo se muestra que debido a la autonomía limitada del vehículo, éste debe realizar varios vuelos para poder cubrir toda el área, lo que eleva considerablemente el tiempo de la misión. Con el empleo de un equipo de UAVs el tiempo requerido para cubrir el área disminuye considerablemente. Actualmente existen muchos grupos de investigación trabajando en el desarrollo de nuevas estrategias sobre esta temática.

En la mayoría de las propuestas presentes en la bibliografía, la planificación de la misión de cobertura del área objetivo para sistemas Multi-UAVs se realiza en dos etapas: primero se descompone el área en tantas subregiones como UAVs disponibles y luego se realiza la planificación de las rutas para cada una de estas subdivisiones. En la referencia [3] se realiza un particionado teniendo en cuenta las capacidades de los UAVs, pero suponiendo que los puntos de lanzamiento de cada UAV se encuentran ubicados de manera que existen entre ellos distancias considerables, con lo cual se eleva la complejidad del proceso de lanzamiento de los UAVs.

En [1] la partición se lleva a cabo a lo largo de la dirección óptima de barrido, lo que permite minimizar el número de giros en las rutas de los UAVs, sin embargo no toma en cuenta la ubicación de la base de lanzamiento, por lo que esta solución pierde bastante eficiencia en aquellas situaciones en las que la accesibilidad del terreno sólo permita una única zona de lanzamiento.

Los autores de la referencia [2] presentan un método de particionado para áreas poligonales cóncavas. Para ello dividen el área en subregiones convexas teniendo como objetivo minimizar la suma de las anchuras de todas las subregiones. Esta propuesta, al igual que la referencia [1], no toma en cuenta la posición de lanzamiento de los UAVs.

En el presente artículo se propone un método que fusiona las etapas de particionado y de planificación de rutas, haciendo posible obtener subregiones orientadas a lo largo de la dirección óptima de barrido, sin solapamiento y accesibles desde una única zona de lanzamiento.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Escenario

En este artículo, se considera un escenario donde un conjunto de n UAVs, U_i, $i = 1,...,n$, con distintos tiempos de autonomía, $T = A_1,...,A_n$, partiendo desde una única zona de lanzamiento *B,* tienen como misión cubrir el área poligonal convexa *P* en el menor tiempo posible. En la figura 1 se muestra un ejemplo del escenario descrito.

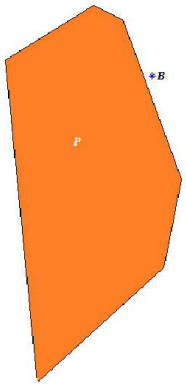


Figura 1: Ejemplo del escenario planteado

El conjunto de autonomías T, realmente indica el 85% de la autonomía real de cada UAV, con el fin de establecer un margen de seguridad del 15%. Los UAVs están organizados de forma descendente con respecto a sus autonomías, por lo que el UAV_1 será el que posea mayor tiempo mientras que el UAV_n será el de menor autonomía de vuelo, $A_1 >,...,> A_n$

La aplicación concreta que motivó el presente trabajo es la detección de *hot spots* (puntos calientes) sobre un terreno quemado. Para ello, todos los UAVs sobrevolarán el área a una altitud *h* y a una misma velocidad V_{UAV}. Cada uno de ellos lleva a bordo una cámara capaz de captar imágenes en la banda de infrarrojo, la cual posee un campo visual capaz de cubrir un área igual a C * C, como se muestra en la figura 2.

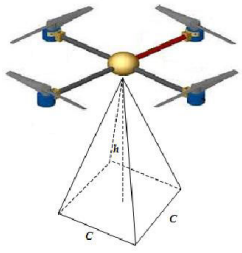


Figura 2: Campo visual de la cámara

Se establecen las siguientes restricciones:

$$(1)\quad \sum_{i=1}^{n} A_i > \tau_{ref}$$

$$(2)\quad n_{UAVs} \leq \left(Nparticiones_{\max} = \frac{AnchuraP}{2 * C} \right)$$

donde τ_{ref} es el tiempo que tarda un único UAV en recorrer toda el área *P,* $Nparticiones_{\max}$ es el número máximo de particiones que se pueden obtener sin solapamiento, la *AnchuraP* es la anchura del área poligonal *P (ver sección 3)* y *C* es la raíz cuadrada del área que cubre el campo visual de la cámara que está a bordo de cada vehículo. Además cada UAV debe poseer una autonomía que garantice que podrá ser capaz de cubrir al menos una partición con anchura igual a *2C.*

2.2 Enfoque

Como en este escenario disponemos de una única zona de lanzamiento, debemos adoptar una estrategia de particionado que nos permita establecer subregiones accesibles de forma directa desde la estación base, y que a su vez se encuentren orientadas en la dirección de barrido óptimo, la cual permite realizar la cobertura del área con el mínimo de giros.

3 DESCOPOSICIÓN DEL ÁREA OBJETIVO Y PLANIFICACIÓN DE RUTAS

Como indicamos en el apartado 1, nuestra propuesta, a diferencia de la mayoría de los métodos planteados en la bibliografía, realiza de manera simultánea los procesos de particionado y de planificación de rutas.

Para lograr esto, primero debemos encontrar la dirección de vuelo que establece el menor número de giros.

En un área poligonal convexa si volamos en dirección perpendicular a la anchura del polígono podremos encontrar la dirección de barrido óptimo. Para dar con la anchura debemos trazar todos los pares de antípodas del tipo V-L (vértice – lado) o del tipo L-L (lado – lado), y el par de antípodas que presente la menor distancia entre sus paralelas es el que establecerá la anchura del polígono. [2] En la figura 3 se muestra este concepto.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

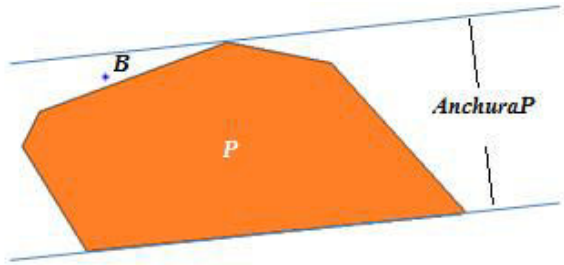


Figura 3: Anchura de un polígono

Para aprovechar al máximo la dirección de barrido óptimo los UAVs realizarán recorrido siguiendo trayectorias tipo zigzag, como se observa en la figura 4.

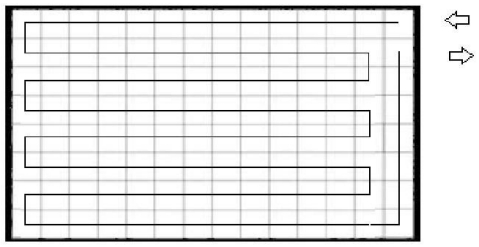


Figura 4: Movimiento tipo zigzag.

Una vez conocida la dirección de vuelo que posee el menor número de giros es posible iniciar el proceso de particionado.

En la bibliografía comúnmente encontramos que el particionado se realiza mediante el cálculo estimado del área que puede volar cada UAV, según sus capacidades, sin embargo nosotros nos enfocamos en el tiempo de autonomía de cada UAV.

La subregión asignada a cada UAV puede ser vista como un conjunto de *waypoints* espaciados a una distancia igual a *C*. La ecuación 3, nos indica el tiempo que se requiere del UAV_i para cubrir una subregión:

$$(3)\quad \tau_{ri} = \tau_C[n_W - 1] + \sum[k\alpha] + \frac{1}{V_{UAV}}[d_{Bi} + d_{Bf}]$$

$$(4)\quad \tau_C = \frac{C}{V_{UAV}}$$

donde τ_{ri} es el tiempo que requiere el UAV_i para cubrir una región asignada, τ_C es el tiempo que tarda un UAV en viajar de un *waypoint* a otro, n_W es el número de *waypoints*, k es una fracción de tiempo que se agrega por cada ángulo de giro, y d_{Bi} y d_{Bf} son las distancias que existen desde la estación base hasta el primer y el último *waypoint,* respectivamente.

Para que una subregión pueda ser asignada al UAV_i, el tiempo necesario para cubrirla en su totalidad nunca podrá ser mayor a la autonomía de la aeronave, $\tau_{ri} \leq A_i$.

Ahora bien, como partimos de la condición de que existe una única zona de lanzamiento, a la hora de realizar el particionado siguiendo el método de la dirección de barrido óptimo se nos presentarán dos casos:

1. La estación base está ubicada de tal forma que el UAV_i puede acceder a la subregión asignada de forma directa, sin necesidad de sobrevolar las regiones asignadas a otros UAVs.
2. La ubicación de la estación base dificulta el acceso de forma directa a la región asignada.

En la figura 5 se puede observar un ejemplo de cada caso.

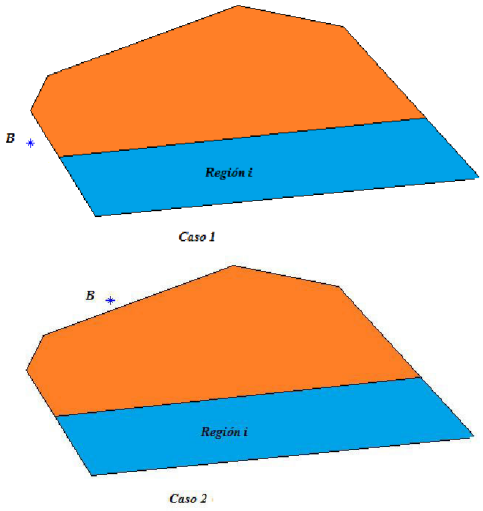


Figura 5: Situaciones que pueden presentarse cuando existe una única zona de lanzamiento de UAVs

Para continuar empleando el método de particionado siguiendo dirección óptima de barrido, sin tener que sobrevolar subregiones asignadas a otros UAVs, debemos crear caminos que permitan a los vehículos acceder a su subregión en los casos en los que no exista la posibilidad de acceder de forma directa desde la estación base. Esta estrategia altera muy poco el tiempo necesario para completar la misión y contribuye a elevar el tiempo de vuelo útil.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de una subregión que consta de rutas que permiten al UAV acceder de forma directa desde la estación base. Los caminos de acceso se crean en los casos donde la trayectoria en línea recta desde la estación base al vértice más cercano de la subregión forma un ángulo menor o igual a 90º con respecto a la línea de barrido

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

óptimo. El UAV ingresará al camino de acceso por el punto más alejado de la estación base, cuando termina el camino de entrada, inicia un desplazamiento en forma de zigzag siguiendo la dirección de barrido óptimo. Para salir de la subregión el UAV toma el camino de acceso por la zona más cercana a la estación base.

.

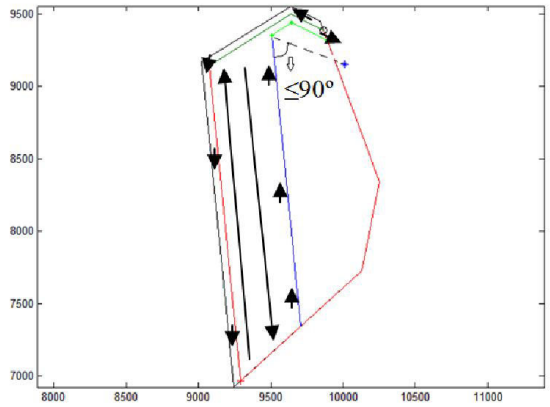


Figura 6: Ejemplo de particionado con camino de acceso.

La anchura de las rutas, al igual que la distancia entre *waypoints*, está delimitada por el área que puede captar el campo visual de la cámara de cada UAV, por lo tanto la anchura de los caminos será igual a *C*.

El proceso de particionado del área y la planificación de las rutas para cada UAV se llevará a cabo siguiendo los siguientes puntos:

- De las paralelas que conforman el par de antípodas que determina la anchura del polígono, se selecciona la línea paralela más distanciada a la ubicación de la estación base.
- Luego se va desplazando la línea seleccionada perpendicularmente a la dirección de barrido óptimo. Cada desplazamiento se realizará a una distancia igual a *2C*, con respecto a la posición anterior.
- En cada desplazamiento se evaluará si la subregión formada requiere la construcción de un camino para permitir el acceso desde la estación base, en caso que exista esta necesidad se procederá a su construcción. También, mediante el empleo de la ecuación 3, decidiremos el límite de expansión de esta subregión, garantizando que el tiempo que requerirá para cubrirla no sea mayor a la autonomía del UAV_1. Una vez se ha delimitado la primera subregión, se volverá a realizar el proceso anterior tantas veces como UAVs existan o como la anchura del polígono permita.
- Si la anchura del polígono ha permitido que en los pasos anteriores se delimitara una subregión para cada UAV, se procederá a realizar una reorganización de las subregiones con el fin de minimizar la diferencia entre los tiempos requeridos por cada subregión.
- Si la anchura del polígono no ha permitido delimitar subregiones para todos los UAVs, se procederá a realizar un proceso de constreñimiento de las subregiones ya establecidas para habilitar espacio para la creación de las subregiones que falten. Posteriormente se procederá a la reorganización de las subregiones con el fin de minimizar la diferencia entre los tiempos requeridos por cada subregión.

A continuación se presenta el algoritmo encargado de realizar el particionado, garantizando el acceso a todas las subregiones, y minimizando el tiempo de ejecución de la misión, para cualquier ubicación de la estación base que pueda presentarse.

Input

- *Área poligonal,* $P = [(x_1, y_1);...;(x_i, y_i)]$
- $N_{UAVs,}\ U_i,\ i = 1,...,n$
- $T = A_1,...,A_n$
- *Mínima anchura posible para cada subregión,* $2C$
- $B = (x, y)$
- $Anchura_P$
- *Línea paralela que determina la dirección de barrido,* $L = [\ x_L\ \ y_L\ \ d_x\ \ d_y\ ]$;
- V_{UAV}

Output

- $Subregiones = [R_1;...;R_n]$;

Procedimiento: Subdivisión del Área Objetivo

$Nparticiones_{\max} = \dfrac{AnchuraP}{2 * C}$;

$Subregiones = [\ ]$;

$J_{indice} = [\ ]$;

$\tau_r = 0$;

$Area_total \longleftarrow Area(P)$;

$Area_suma_r = 0$;

$tiempos_sr = [\ ]$;

$temp_Subregiones = [\ ]$;

$if\ \ (N_{UAVs} == Nparticiones_{\max})$;

$i = 0$;

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

while $(i < Nparticiones_{\max})$;
$i++$;
Desplazar L una distancia de 2C;
Si es necesario construir un camino de acceso a la subregión;
Guardar vértices de la subregión en R ;
$j = n_vertices(R)$;

$$\tau_r = \tau_C[n_W - 1] + \sum[k\alpha] + \frac{1}{V_{UAV}}[d_{Bi} + d_{Bf}];$$

$tiempos_sr = [tiempos_sr; \tau_r]$;
$Subregiones = [Subregiones; R]$;
$J_{indice} = [J_{indice}; j]$;
End while
Repartir las subregiones a los UAVs según los τ_r *, la subregión con mayor* τ_r *será asignada al* UAV_1 *y la de menor al* UAV_n ;
else
$i = 0$;
while $Area_total > Area_suma_r$;
$i++$;
while $\tau_{ri} < T(i)$
Desplazar L una distancia de 2C;
Si es necesario, construir un camino de acceso a la subregión;

$$\tau_{ri} = \tau_C[n_W - 1] + \sum[k\alpha] + \frac{1}{V_{UAV}}[d_{Bi} + d_{Bf}];$$

Guardar vértices de la subregión en R;
End while ;
$j = n_vertices(R)$;
$temp_Subregiones = [temp_Subregiones; R]$;
$J_{indice} = [J_{indice}; j]$;
Calcular la suma de las áreas de las Subregiones y guardar en $Area_suma_r$;
End while ;
$n_particiones = i$;
if $(n_particiones == N_{UAVs})$
Aplicar a $temp_Subregiones$ *el reprocesado para minimizar las diferencias entre los* τ_r *de cada subregión;*
$Subregiones \longleftarrow temp_Subregiones$;
else
Desplazar las subregiones en dirección al Punto más lejano, hasta que existan tantas subregiones como UAVs disponibles;
Aplicar a $temp_Subregiones$ *el reprocesado para minimizar las diferencias entre los* τ_r *de cada subregión;*
$Subregiones \longleftarrow temp_Subregiones$;
End if
End if

4 DETALLES DE IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DE SIMULACIONES

El algoritmo presentado en este artículo ha sido implementado en Matlab empleando para ello la librería Geom2d, la cual permite mediante el manejo a bajo nivel de las primitivas geométricas, construir complejos algoritmos geométricos.

A continuación se mostrarán los resultados de la simulación para un equipo de tres UAVs que operan bajo los parámetros plasmados en la tabla1.

Tabla 1: Parámetros de configuración de la misión

UAVs	Autonomía(s)	h(m)	V(m/s)	C(m)
UAV_1	3000	75	5	50
UAV_2	2000	75	5	50
UAV_3	1300	75	5	50

En esta simulación el factor de penalización por ángulo de giro, *k*, tomará el valor de 0.444 para todos los UAVs, lo que nos indica que por cada 45º de cambio de dirección en la ruta, se sumarán 2s al tiempo requerido para cubrir la subregión.

La figura 7 muestra el resultado de la asignación de subregiones usando el algoritmo presentado en el apartado 3. Debido a la ubicación de la estación base, ha sido necesario crear caminos de acceso a las subregiones asignadas a los UAVs 1 y 2.

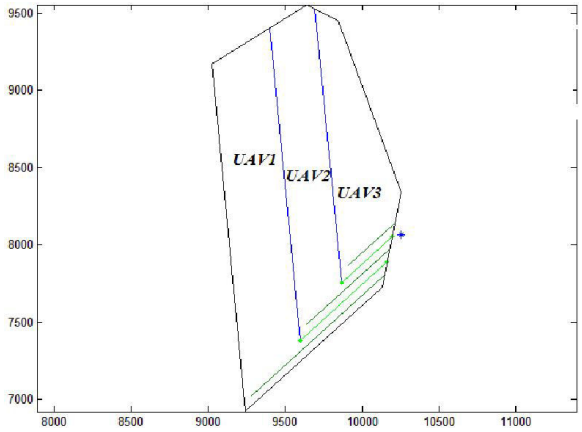


Figura 7: Subregiones resultantes de la aplicación del algoritmo del apartado 3.

Como indicamos en el apartado anterior, el algoritmo planteado en este artículo se enfoca en el tiempo de autonomía de vuelo de los vehículos, de modo que el tamaño de la subregión asignada a cada UAV será tal que el tiempo necesario para su recorrido sea menor o igual a su autonomía. En la tabla 2 se muestran los tiempos de vuelo resultantes para cada UAV. Cabe destacar que todos los UAVs inician el vuelo en el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mismo instante de tiempo, el UAV con mayor tiempo de recorrido determinará la duración global de la misión. En este caso, el tiempo de vuelo del UAV_1 indica que el tiempo total de duración de la misión es de 2622 s.

Tabla 2: Tiempos de vuelo para cada UAV

UAVs	Tiempo de vuelo (s)
UAV_1	2622
UAV_2	1812
UAV_3	1161

También resulta interesante destacar que puesto que, obviamente, el tiempo mínimo de misión se obtendría en el caso en que los tiempos de recorrido de todos los UAVs fuesen iguales, el algoritmo intenta acercarse lo más posible a este óptimo teórico, contemplando las restricciones que imponen, por una parte, las autonomías de los UAVs que componen la flota y, por otra, el hecho de que en cada subregión debe establecerse un número par de caminos de ida y vuelta para poder volarla.

Con las consideraciones anteriores, la figura 8 muestra el resultado completo del algoritmo presentado en la sección 3; esto es, las subregiones asignadas a cada UAV y las trayectorias de vuelo en cada una de ellas.

Nótese que las trayectorias de vuelo siguen siempre la dirección de barrido óptimo, para así agregar la menor cantidad de giros posible. Los UAVs recorrerán estas rutas realizando la trayectoria de tipo zigzag que muestra la figura.

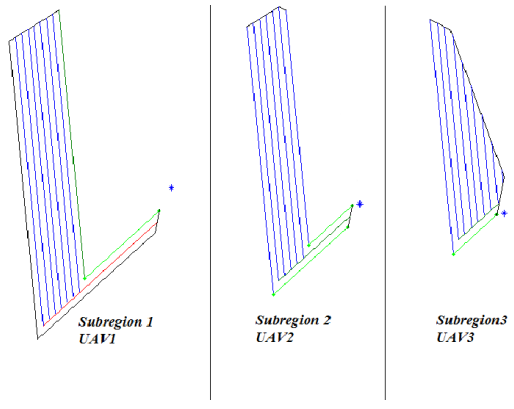


Figura 8: Resultado total del algoritmo: Subregiones asignadas a cada UAV y trayectorias de vuelo en cada una de ellas.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha presentado un método que permite cubrir, en tiempo mínimo, un área objetivo a inspeccionar, utilizando para ello una flota de UAVs con diferentes autonomías.

Las características principales del algoritmo propuesto, que constituyen las principales aportaciones del trabajo, son, por una parte, el establecimiento de manera simultánea de las subregiones a asignar a cada UAV y las trayectorias óptimas de vuelo en cada subregión, considerando los tiempos de autonomía de los UAVs. Por otra parte, la existencia de una base única de lanzamiento de los UAVs, como planteamiento más habitual en la práctica.

Las extensiones más inmediatas del trabajo presentado pueden establecerse en dos líneas: por una parte, parametrizar el modelo presentado con datos reales, mediante la realización de experimentos de vuelo con UAVs reales (de los que se dispone), para contrastar los resultados de vuelo real con los obtenidos en simulación. Por otra parte, la extensión del algoritmo a áreas objetivo con zonas no volables, así como a áreas objetivo no convexas.

Agradecimientos

La financiación para el desarrollo de este trabajo se ha obtenido de los siguientes proyectos:

FireGUARD: Gestión del Fuego mediante la coordinación eficiente de recursos de tierra y aire (TIN2011-29494-C03).

Laboratorio de Aeronaves no tripuladas para el diseño/validación y verificación de algoritmos de detección y resolución de conflictos (UNAB10-4E-770).

Referencias

[1] Araujo, J. F., Sujit, P. B., & Sousa, J. B. (2013, April). Multiple UAV area decomposition and coverage. In *Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA), 2013 IEEE Symposium on* (pp. 30-37). IEEE.

[2] Jiao, Y. S., Wang, X. M., Chen, H., & Li, Y. (2010, June). Research on the coverage path planning of UAVs for polygon areas. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on* (pp. 1467-1472). IEEE.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[3] Maza, I., & Ollero, A. (2007). Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In*Distributed Autonomous Robotic Systems 6* (pp. 221-230). Springer Japan.

[4] Valente, J. (2011). *An Aerial Robotic Framework to address Area Coverage in Precision Agriculture Practices.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño de control no lineal para regulación de tasa de crecimiento en cultivos multi-sustrato

Sebastián Nuñez†, Fabricio Garelli†, Hernán De Battista†, Jesús Picó‡
†CONICET y LEICI - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata,
CC 91 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Email: {sebastian.nuniez,fabricio,deba}@ing.unlp.edu.ar
‡Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. Email: jpico@upv.es

Resumen

En este trabajo se considera un cultivo semi-continuo alimentado con dos sustratos donde el objetivo de control es la regulación de la tasa de crecimiento. Se propone incorporar a una ley de alimentación de sustratos proporcional a la biomasa un término correctivo no lineal del error de tasa de crecimiento. La propuesta se evalúa numéricamente en un cultivo con cinética aditiva, donde se exhiben una mayor velocidad de convergencia y una reducción en la variación obtenida ante incertidumbre en los parámetros del modelo.

Palabras clave: biorreactor, control no lineal, cultivo semi-continuo

1. Introducción

Los procesos biotecnológicos comprenden una amplia gama de aplicaciones de microorganismos para la producción de diversos metabolitos requeridos en diversas industrias como las alimenticias, farmacéuticas y químicas. También tienen aplicación en la generación alternativa de energía (hidrógeno, butano, metano) a partir de recursos renovables, en el desarrollo de nuevos productos como los biopolímeros y en la biorremediación de sustancias tóxicas tales como fenol y tolueno [4, 5].

Una clase importante de bioprocesos, con creciente interés industrial, es la de los procesos multi-sustrato. En estos cultivos el crecimiento microbiano está directamente influenciado por dos o más sustratos. Esos nutrientes pueden cumplir la misma función como es el caso de dos fuentes de carbono, o utilizarse para cubrir diferentes requerimientos [16]. En cualquier caso, el crecimiento influenciado por múltiples sustratos representa un problema de control más complejo que en el caso de cultivos alimentados con un único sustrato. Según como sean utilizados los nutrientes, pueden resultar dinámicas de crecimiento limitado simultáneamente, crecimiento en dos fases (crecimiento diáuxico) o crecimiento aumentado por un segundo camino metabólico [12]. Esto lleva a diferentes modelos dinámicos para la denominada tasa específica de crecimiento (μ) y para las tasas específicas de consumo de los sustratos.

En muchos procesos, la regulación de la tasa de crecimiento es un objetivo de control primordial ya que esta variable suele ser relacionada con el estado metabólico del microorganismo, las características de los metabolitos producidos y con la formación de subproductos que pueden resultar indeseados para el objetivo de producción [11]. Para el caso multi-sustrato, un objetivo de control adicional es regular el crecimiento en cada sustrato. Este requerimiento está estrechamente vinculado con las propiedades del producto que se desea obtener [15].

Con el objetivo de regular las tasas de crecimiento, se han propuesto leyes de alimentación exponenciales de lazo abierto muchas de las cuales son extensiones de las utilizadas en cultivos con un único sustrato limitante [6, 2]. En [10] se presentó una ley exponencial para alimentar dos sustratos basada en la realimentación de biomasa. Este enfoque considera el valor de biomasa actual en el cálculo de los flujos de entrada lo que evita problemas asociados a la sobrealimentación del cultivo. Luego en [14] se propuso la aplicación de una ley de alimentación no lineal junto con un observador de tasas de reacción para realimentar no solo la biomasa sino también las tasas de crecimiento individuales. Todas las propuestas mencionadas corresponden a casos donde la dinámica de crecimiento es modelizada como aditiva.

En este trabajo se considera un cultivo alimentado con dos sustratos donde el objetivo principal es la regulación de la tasa de crecimiento a un valor $\mu = \mu_{ref}$, el cual se asume compatible con cierto estado fisiológico deseado para el microorganismo. En el trabajo [14], los autores presentaron una ley proporcional-integral no lineal que permite regular ambas tasas de crecimiento cuando estas pueden ser distinguidas en forma individual. El hecho de distinguir las tasas de crecimiento en cada sustrato puede requerir la medición de más de una concentración, por ejemplo biomasa y uno de los sustratos. El objetivo de este trabajo es evaluar las mejoras que se obtienen al incorporar una estimación de la tasa de crecimiento total (en lugar de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

las tasas de crecimiento individuales) a una ley de alimentación proporcional a la biomasa. El argumento principal es que bajo la hipótesis de que se dispone de medición en línea de la concentración de biomasa, pueden considerarse observadores robustos de μ con convergencia en tiempo finito para incorporar el error de regulación de μ.

2. Desarrollo

2.1. Modelo del bioproceso

En un cultivo semi-continuo con tasa de crecimiento aditiva en dos sustratos, la dinámica de las principales sustancias puede ser descripta con el siguiente modelo de estados [7]

$$\dot{x} = (\mu_1 + \mu_2)x - \frac{x}{v}F_1 - \frac{x}{v}F_2, \quad (1)$$

$$\dot{s}_1 = -\frac{\mu_1 x}{y_1} + \frac{(S_{1in} - s_1)}{v}F_1 - \frac{s_1}{v}F_2, \quad (2)$$

$$\dot{s}_2 = -\frac{\mu_2 x}{y_2} - \frac{s_2}{v}F_1 + \frac{(S_{2in} - s_2)}{v}F_2, \quad (3)$$

$$\dot{v} = F_1 + F_2, \quad (4)$$

donde x, s_1 y s_2 son las concentraciones de biomasa y sustratos (g/L) y v el volumen de la fase liquída del biorreactor. $\mu_i(s_i)$ es la tasa de crecimiento en el sustrato i la cual se supone monótona. Las entradas de control son los flujos aplicados F_i que alimentan al biorreactor con el sustrato i en concentración $S_{(i)in}$.

2.2. Ley de alimentación proporcional a la biomasa

Se considera que el objetivo de la alimentación aplicada al proceso semi-continuo (1)-(4) es regular la tasa de crecimiento al valor μ_{ref}. De esta manera, la trayectoria nominal deseada es la de crecimiento exponencial, donde la cantidad de biomasa total $X(t) = xv$ evoluciona según

$$X^*(t) = x_0 v_0 e^{\mu_{ref} t}. \quad (5)$$

Este objetivo puede lograrse aplicando flujos de alimentación que sean proporcionales a la cantidad de biomasa

$$F_i = \lambda_{ir} x v, \quad (6)$$

donde $\lambda_{ir} > 0$ es un coeficiente de proporcionalidad. Estos parámetros deberían seleccionarse de manera de obtener el valor deseado de μ_i.

Para el caso de cinéticas aditivas, y bajo la hipótesis de que la concentración de biomasa se mide en línea, puede calcularse un control invariante resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones [10]

$$\mu_i(s_{ir}) = \mu_{ir}, \quad (7)$$

$$\dot{s}_i = \left(-\frac{\mu_{ir}}{y_i} + \lambda_i S_{i(in)} - (\lambda_1 + \lambda_2)s_{ir}\right)x = 0, \quad (8)$$

para $i = 1, 2$. La ec. (7) permite calcular los valores de sustrato s_{ir} que corresponden a los μ_{ir} deseados. La ec. (8), que resulta de reemplazar (6) en las expresiones (2) y (3), provee los valores $\lambda_{1r}, \lambda_{2r}$ que mantienen $s_i = s_{ir}$ para el caso de condiciones iniciales apropiadas ($s_{i0} = s_{ir}$), con las tasas de crecimiento en $\mu_i(s_{ir}) = \mu_{ir}$. Resolviendo las expresiones (7)-(8) se obtienen las siguientes ganancias [10]

$$\lambda_{1r} = \frac{\mu_{1r}/y_1(S_{2in} - s_{2r}) + \mu_{2r}/y_2 s_{1r}}{S_{1in}S_{2in} - S_{2in}s_{1r} - S_{1in}s_{2r}}, \quad (9)$$

$$\lambda_{2r} = \frac{\mu_{2r}/y_2(S_{1in} - s_{1r}) + \mu_{1r}/y_1 s_{2r}}{S_{1in}S_{2in} - S_{2in}s_{1r} - S_{1in}s_{2r}}, \quad (10)$$

las cuales pueden ser aplicadas en la expresión (6).

Por otro lado, si se supone crecimiento exponencial con $\mu_i = \mu_{ir}$ y se reemplaza (6) en la dinámica de la biomasa (ec. (1)), se tiene

$$\dot{x} = (\mu_{1r} + \mu_{2r})x - (\lambda_{1r} + \lambda_{2r})x^2. \quad (11)$$

Esta ecuación diferencial ordinaria de primer orden es de la forma $\dot{x} = ax - bx^2$ con $a = \mu_{1r} + \mu_{2r}$, $b = \lambda_{1r} + \lambda_{2r}$. Su solución es

$$x^*(t) = \frac{a/b}{1 + \left(\frac{a}{bx_0} - 1\right)e^{-at}}. \quad (12)$$

Dado que $X^*(t) = x^*(t)v^*(t)$ y utilizando la expresión (5) se obtiene la evolución del volumen:

$$v^*(t) = v_0 + x_0 v_0 \frac{b}{a}\left(e^{at} - 1\right). \quad (13)$$

En las expresiones (12)-(13) se observa que la biomasa sigue una trayectoria acotada mientras que el volumen crece en forma exponencial. Para obtener $\mu_i = \mu_{ir}$, los sustratos deben alcanzar la variedad definida por $s_i^*(t) = s_{ir}$, donde s_{ir} es el valor obtenido de la expresión (7). Por esta razón interesa analizar la estabilidad del sistema respecto a un subconjunto de los estados, en particular los sustratos.

El enfoque que permite formalizar el análisis de estabilidad de un sistema respecto de un subconjunto de las variables de estado es el provisto por la teoría de estabilidad parcial [1].

2.3. Estrategia propuesta

Se propone aplicar realimentación no lineal de la forma

$$F_i = \lambda_{ir}(1 + ke)xv, \quad (14)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

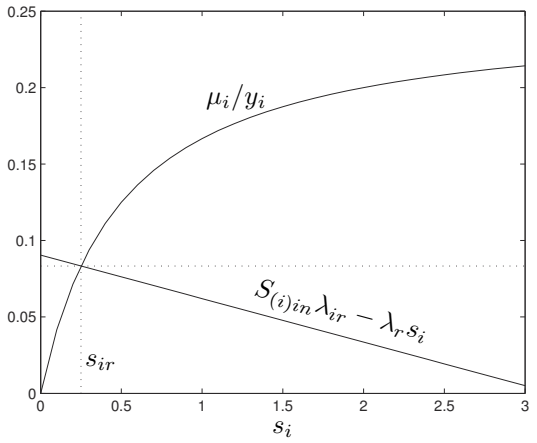


Figura 1: Términos que conforman $z_i(s_i)$ para cinéticas monótonas (tipo Monod).

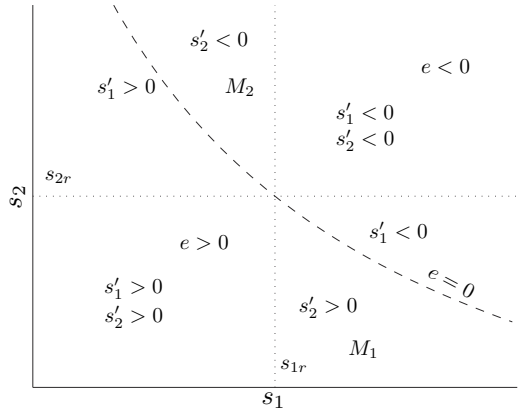


Figura 2: Plano s_1-s_2: análisis cualitativo de la trayectoria de los sustratos.

donde $e \coloneqq \mu_{ref} - \mu$. Notar que con $k = 0$ se recupera la expresión de flujos proporcionales a la biomasa descripta en (6).

A partir de las expresiones (2)-(3) y la ley de alimentación (14) se obtienen las siguientes expresiones de lazo cerrado

$$\dot{s}_1 = -x\left(z_1 - (S_{1in}\lambda_{1r} - \lambda_r s_1)ke\right), \qquad (15)$$
$$\dot{s}_2 = -x\left(z_2 - (S_{2in}\lambda_{2r} - \lambda_r s_2)ke\right), \qquad (16)$$

donde $\lambda_r = \lambda_{1r} + \lambda_{2r}$ y

$$z_i(s_i) = \frac{\mu_i}{y_i} - (S_{(i)in}\lambda_{ir} - \lambda_r s_i). \qquad (17)$$

2.3.1. Análisis de estabilidad

El objetivo de esta sección es analizar si las trayectorias de los sustratos convergen al punto deseado (s_{1r}, s_{2r}), que corresponde a las tasas de crecimiento μ_{1r}, μ_{2r}. Esto se realiza en el contexto de estabilidad parcial antes mencionado. Notar que ambos sustratos son afectados por el error en la tasa de crecimiento del otro sustrato a través de ke. Para realizar el análisis de (15)-(16) es conveniente destacar que los términos λ_{ir} fueron calculados tal que $\dot{s}_i = 0$ en $s_i = s_{ir}$. Esto implica que μ_i/y_i y la recta definida por $S_{(i)in}\lambda_{ir} - \lambda_r s_i$ se intersectan en $s_i = s_{ir}$ (ver fig. 1) y además z_i es positivo si $s_i > s_{ir}$ y negativo cuando $s_i < s_{ir}$. Luego, para cinéticas monótonas como Monod y Tessier [7], se tiene que para todo $s_i \neq s_{ir}$

$$(s_i - s_{ir})z_i > 0. \qquad (18)$$

Cambio de coordenada temporal El cambio de coordenada temporal $\xi : t \to \tau$ definido por

$$\tau = \int x(\sigma)d\sigma, \qquad (19)$$

es una función biyectiva y diferenciable que mapea cualquier intervalo cerrado $[t_a, t_b]$ en un intervalo $[\tau_a, \tau_b]$. Además ξ tiene derivada positiva $(d\tau/dt = x(t) \geq x_0 > 0)$. Luego (19) define una parametrización regular que preserva la estabilidad (puede verse Def. 5 y Prop. 6 en [9]).

Ahora, aplicando (19) a las expresiones (15)-(16) se obtiene

$$s_1' = -z_1 + (S_{1in}\lambda_{1r} - \lambda_r s_1)ke, \qquad (20)$$
$$s_2' = -z_2 + (S_{2in}\lambda_{2r} - \lambda_r s_2)ke, \qquad (21)$$

donde $s_i' \coloneqq ds_i/d\tau$. Notar que se obtuvo un sistema que solo depende de las variables de estado s_1, s_2.

En las expresiones (20)-(21) puede verse que si $k = 0$, entonces $s_i' = -z_i$. Si se considera la función definida positiva

$$V(s_1, s_2) = \frac{(s_1 - s_{1r})^2}{2} + \frac{(s_2 - s_{2r})^2}{2}, \qquad (22)$$

la derivada con respecto a τ resulta

$$V' = -\left[(s_1 - s_{1r})z_1 + (s_2 - s_{2r})z_2\right] < 0. \qquad (23)$$

La negatividad de V' se debe a la expresión (18). Luego, la expresión (22) es una función de Lyapunov y el punto de operación deseado es asintóticamente estable. Dado que el escalado temporal preserva la estabilidad, las trayectorias en la coordenada temporal original $(s_1(t), s_2(t))$ también convergen a (s_{1r}, s_{2r}).

Cuando se considera $k > 0$, el efecto del error en μ afecta la dinámica de ambos estados. A continuación se presenta un análisis sencillo basado en información que puede determinarse fácilmente por inspección de las expresiones (20)-(21).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

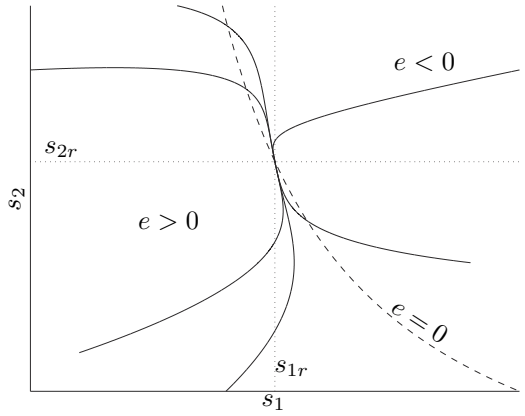


Figura 3: Ejemplo de varias trayectorias para $k = 3$ (ver valores de los parámetros del modelo en la Sección 3).

Análisis basado en las trayectorias Para simplificar el análisis en el caso $k > 0$, a partir de (20)-(21) puede encontrarse el signo de s_i' en cada región del plano (s1-s2). Esto brinda información cualitativa de la evolución del estado respecto de los sustratos. La figura 2 muestra los signos de s_i' en el plano (s1-s2) donde puede concluirse que las trayectorias evolucionan o bien hacia el punto deseado o al menos hacia las regiones definidas como M_1 y M_2. Notar que estas regiones se encuentran delimitadas por la curva $e = 0$ (correspondiente a $\mu = \mu_{ref}$) y la recta $s_1 = s_{1r}$. Luego, considerando que en M_1 se tiene $e > 0$, de la expresión (20) puede determinarse que

$$s_1' = \begin{cases} (S_{1in}\lambda_{1r} - \lambda_r s_{1r})ke > 0 & \text{si } s_1 = s_{1r} \\ -z_1 < 0 & \text{si } e = 0 \end{cases} \tag{24}$$

donde se usó el hecho de que $z_1(s_{1r}) = 0$ y $z_1(s_1) > 0$ para $s_1 > s_{1r}$ (ver fig. 1). Además, a partir de (21) se obtiene que en M_1, $s_2' > 0$ (ya que $z_2 < 0$ en esta región). El mismo análisis aplicado a las fronteras de M_2 resulta en $s_1' < 0$ si $s_1 = s_{1r}$ y $s_1' > 0$ para $e = 0$. Además $s_2' < 0$ en todo M_2. El análisis realizado sobre las fronteras muestra que M_1, M_2 son subespacios *positivamente invariantes*. De esta manera trayectorias $(s_1(\tau), s_2(\tau))$ que ingresan o se inician en este subespacio, permanecen dentro para todo tiempo futuro. En particular, debido al signo de s_2', convergen a (s_{1r}, s_{2r}). Nuevamente, dado que el escalado temporal preserva la estabilidad, las trayectorias en la coordenada temporal original $(s_1(t), s_2(t))$ convergen a (s_{1r}, s_{2r}). A modo de ejemplo, en la figura 3 se presentan trayectorias obtenidas desde diferentes condiciones iniciales para $k = 3$.

Selección del parámetro k El análisis previo muestra que el punto (s_{1r}, s_{2r}) es estable para $k > 0$. El rango de valores de k puede determinarse a partir de considerar la restricción sobre los caudales: $0 \leq F_i \leq F_{max}$. Suponiendo que F_{max} es lo suficientemente grande, la restricción la impone el hecho de que los flujos requeridos a las bombas deben ser no negativos, luego debe cumplirse $1 + ke \geq 0$. Además, el error $e = \mu_{ref} - \mu$ resulta acotado por $\mu_{ref} - \mu_{max} \leq e \leq \mu_{ref}$. A partir de esto puede definirse un valor de k o bien, dado un valor para k, obtenerse el valor mínimo de error para el cual se cumple la restricción sobre el caudal. Otra posibilidad es reemplazar ke con una función del error $f(e)$ que sea suave y sature en -1 evitándose así los valores negativos. Por ejemplo, puede considerarse la función $f(e) = \tanh(ke)$, la cual se comporta linealmente alrededor de $e = 0$ y provee una saturación suave a $(-1, 1)$. Con esta expresión el análisis previo sigue siendo válido ya que se basa en el signo de $f(e)$ y no en el valor provisto por la acción de control.

La hipótesis en la que se basa el análisis de estabilidad previo, tanto para $k = 0$ como para $k > 0$, es que vale la expresión (18). Esto puede no ser cierto en caso de cinéticas con inhibición como el modelo de Haldane. En ese caso, y dependiendo del valor de la constante de inhibición, puede resultar que se evolucione a un punto de operación no deseado. Esta situación puede ser resuelta aplicando una saturación adecuada sobre F_i de manera de evitar que se pueda evolucionar hacia concentraciones de sustratos no deseadas.

3. Resultados y discusión

En esta sección se comparan las leyes de alimentación proporcional a la biomasa sin y con realimentación del error en μ, las cuales están descriptas por las expresiones (6) y (14), respectivamente.

Las tasas de crecimiento individuales en el bioproceso (1)-(4) se asumen términos Monod. Los parámetros utilizados son $\mu_{max1} = 0{,}5\ h^{-1}$, $\mu_{max2} = 0{,}2\ h^{-1}$, $k_{s1} = 0{,}5$ g/L, $k_{s2} = 0{,}5$ g/L, $y_1 = 2$ g/g, $y_2 = 2{,}1$ g/g, $S_{1in} = S_{2in} = 20$ g/L. Las condiciones iniciales del biorreactor en la etapa de cultivo semi-continuo son $x(0) = 5$ g/L, $v(0) = 1$ L, $s_1(0) = 0{,}03$ g/L y $s_2(0) = 0{,}01$ g/L.

El objetivo es regular las tasa de crecimiento en $\mu_{ref} = 0{,}25\ h^{-1}$ con una relación $\mu_{1r}/\mu_{2r} = 2$, de lo que resulta $\mu_{1r} = 0{,}167\ h^{-1}$ y $\mu_{2r} = 0{,}083\ h^{-1}$. Las ganancias λ_{1r} y λ_{2r} calculadas con las expresiones (9)-(10) resultan 0,0042 y 0,0022 respectivamente. Para el parámetro k se seleccionó el valor $k = 3$, con lo cual se garantiza la positivi-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

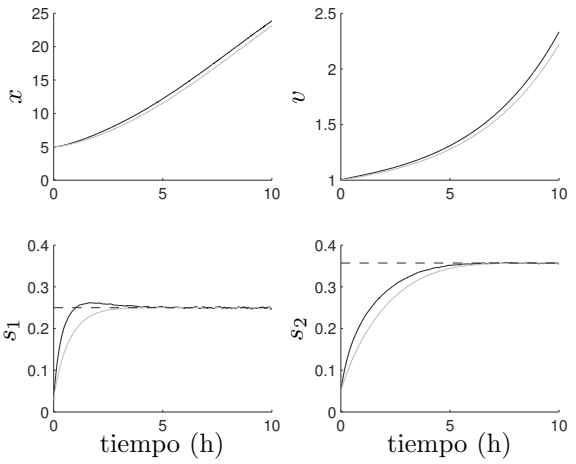


Figura 4: Evolución de los estados con $k = 3$ (línea negra) y lazo abierto ($k = 0$) (línea gris).

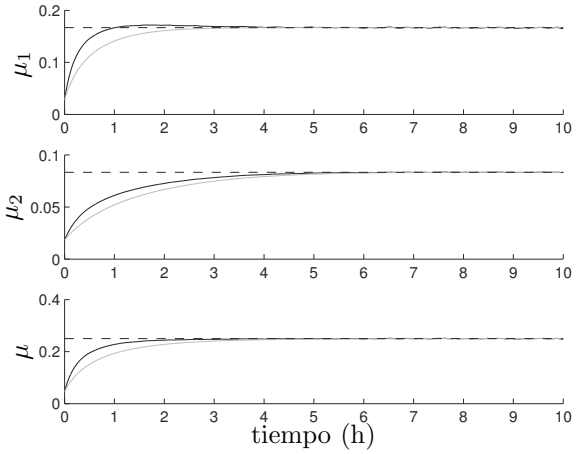


Figura 5: Evolución de las tasas de crecimiento μ_1, μ_2 y μ con $k = 3$ (línea negra) y lazo abierto ($k = 0$) (línea gris).

dad de $(1 + ke)$ si $e > -0{,}33\ h^{-1}$. La medición de biomasa se consideró con ruido filtrado de 5 % de amplitud, media nula y $\sigma = 0{,}1414$ g/L.

La tasa de crecimiento fue estimada utilizando el observador por modo deslizante de segundo orden presentado en [8], el cual provee de una estimación suave de tasas de reacción a partir de la medición de variables relacionadas. En este caso, la variable disponible es la concentración de biomasa. Para el caso de estimar una sola reacción, las expresiones del observador resultan

$$\dot{\hat{x}} = \bar{\rho} u_1 x_m + 2k_2 x_o \rho u_2, -D x_m, \tag{25a}$$

$$\dot{u}_1 = k_1 SIGN(\sigma), \tag{25b}$$

$$u_2 = ABS(\sigma)^{1/2} SIGN(\sigma), \tag{25c}$$

$$\sigma = (x_o \bar{\rho})^{-1} (x_m - \hat{x}), \tag{25d}$$

donde $\bar{\rho}$ es una cota de la derivada de la función a estimar (en este caso $\mu(t)$), x_m representa la concentración de biomasa medida, $D = (F_1 + F_2)/v$ la dilución total y σ es una función construida a partir del error de estimación en x. Los parámetros α, β pueden elegirse de tal forma que el observador converge en tiempo finito (ver más detalles en [8]). Para esto se requiere calcular, a partir del rango de excursión que tendrá la variable medida, el valor $x_o = (x_{min} + x_{max})/2$. En este caso se seleccionó $x_{min} = x_0 = 5$ g/L y $x_{max} = 35$ g/L los cuales se consideran valores suficientes de acuerdo a la excursión de biomasa prevista. Con estos parámetros y siguiendo el procedimiento detallado en [8], se obtuvieron las ganancias $\alpha = 1{,}3$ y $\beta = 1{,}35$ mientras que se seleccionó $\bar{\rho} = 0{,}4$. Las condiciones iniciales del observador fueron $(\hat{x}_0, u_{10}) = (x_{m0}, 0{,}05)$. Cabe destacar que en la implementación de la ley (14) pueden emplearse otros observadores con convergencia en tiempo finito (ver por ejemplo [3, 13]).

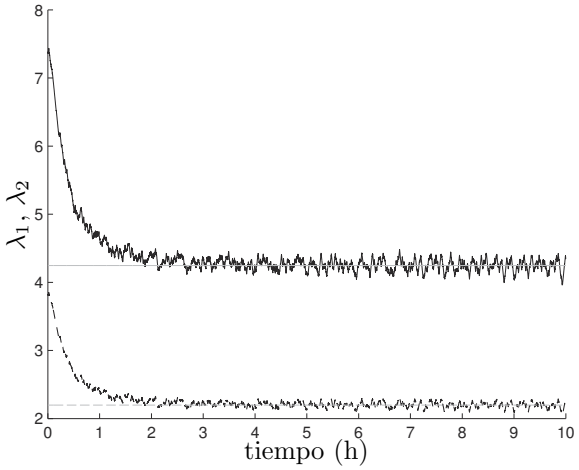


Figura 6: Acciones de control aplicadas en λ_1 (línea sólida) y λ_2 (línea a trazos).

Los resultados obtenidos con $k = 3$ y con $k = 0$, es decir sin realimentación del error en μ, se presentan en las figuras 4, 5 y 6. Puede apreciarse que la realimentación del error incrementó los valores de λ_1 y λ_2 aplicados durante las primeras horas del cultivo. Como resultado se obtuvo una convergencia más rápida de la tasa de crecimiento al valor de referencia $\mu = \mu_{ref}$.

Los valores de λ_{1r} y λ_{2r} fueron calculados a partir de los parámetros exactos del modelo del proceso. Es de esperar que ante incertidumbre en estos valores no se pueda regular μ al valor deseado y es esperable también que la realimentación propuesta reduzca el error resultante. La figura 7 presenta los resultados obtenidos con errores del -20 %, y -10 % en λ_{1r} y λ_{2r}, respectivamente. Este error puede atribuirse, entre otros factores, a los rendimientos y_i los cuales pueden variar durante el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

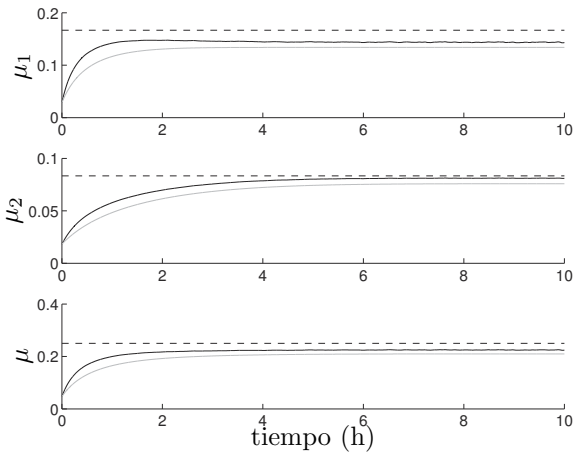


Figura 7: Evolución de las tasas de crecimiento μ_1, μ_2 y μ con $k = 3$ (línea negra) y $k = 0$ (línea gris) en el caso de incertidumbre en los parámetros λ_{1r} y λ_{2r}.

transcurso del cultivo. Sin realimentación de μ, para el valor de referencia seleccionado ($\mu_{ref} = 0{,}25$ h^{-1}) se obtuvo un error en μ de -15 %. Aplicando realimentación de μ ($k = 3$) el error en μ fue -10 %. Este error puede reducirse aún más si se aumenta el valor de k. Por ejemplo, utilizando $k = 5$ el error resultó de -7 %. Por otro lado debe considerarse que a mayor k, se tiene mayor efecto del ruido de medición y el rango en el que $1 + ke$ es no negativo se reduce. Los resultados sugieren que agregar una realimentación de μ a la expresión (6) permite acelerar la convergencia y reducir el error en la regulación de la tasa de crecimiento total.

4. Conclusión

La principal conclusión de este trabajo es que agregar realimentación del error en la tasa de crecimiento total a una ley de alimentación proporcional a la concentración de biomasa permite mejorar la performance de regulación. En particular se ilustró que para procesos con crecimiento aditivo, un término correctivo no lineal permite acelerar la convergencia al valor de referencia y reducir los errores producidos debido a la incertidumbre en los parámetros del modelo. Cabe destacar que si se utiliza un observador de μ basado en medición de biomasa, las mejoras se introducen sin requerir mediciones adicionales del proceso.

Como trabajo futuro se pretende diseñar una ley de alimentación con efecto integral con el objetivo de rechazar errores constantes en la regulación de μ debido a incertidumbre en los parámetros y extender los resultados a cinéticas con inhibición (modelos tipo Haldane), los cuales representan la otra gran familia de cinéticas de crecimiento.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por CONICET (PIP 0361), MINCyT (PICT 2011-0888, 2012-0037) y la Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I164) de Argentina; y por el proyecto FEDER-CYCIT DPI2011-28112-C04-01 del Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España.

S. Nuñez también agradece al programa BEC.AR de la Jefatura de Gabinete de Ministros de la Nación Argentina.

Referencias

[1] V. Chellaboina and M.M. Haddad. A unification between partial stability and stability theory for time-varying systems. *Control Systems, IEEE*, 22(6):66–75, Dec 2002.

[2] Bor-Yann Chen, Jun-Wei You, and Jo-Shu Chang. Optimal exponential feeding strategy for dual-substrate biostimulation of phenol degradation using cupriavidus taiwanensis. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1):507 – 514, 2009.

[3] H. De Battista, J. Picó, F. Garelli, and J. L. Navarro. Reaction rate reconstruction from biomass concentration measurement in bioreactors using modified second-order sliding mode algorithms. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 35:1615–1625, 2012.

[4] Wei-Chen Kao, De-Shun Lin, Chieh-Lun Cheng, Bor-Yann Chen, Chiu-Yue Lin, and Jo-Shu Chang. Enhancing butanol production with *Clostridium pasteurianum* CH4 using sequential glucose-glycerol addition and simultaneous dual-substrate cultivation strategies. *Bioresource Technology*, 135:324 – 330, 2013.

[5] J. Liu, X. Jia, J. Wen, and Z. Zhou. Substrate interactions and kinetics study of phenolic compounds biodegradation by *Pseudomonas sp.* cbp1-3. *Biochemical Engineering Journal*, 67:156 – 166, 2012.

[6] H. Moon, S.W. Kim, J. Lee, S.K. Rhee, E.S. Choi, H.A. Kang, I.H. Kim, and S.I. Hong. Independent exponential feeding of glycerol and methanol for fed-batch culture of recombinant *Hansenula polymorpha* DL-1. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 111(2):65–79, 2003.

[7] J. Nielsen, J. Villadsen, and G. Lidén. *Bioreaction Engineering Principles*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2003.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[8] S. Nuñez, H. De Battista, F. Garelli, A. Vignoni, and J. Picó. Second-order sliding mode observer for multiple kinetic rates estimation in bioprocesses. *Control Engineering Practice*, 21(9):1259 – 1265, 2013.

[9] J. Picó, E. Picó-Marco, A. Vignoni, and H. De Battista. Stability preserving maps for finite-time convergence: Super-twisting sliding-mode algorithm. *Automatica*, 49(2):534 – 539, 2013.

[10] E. Picó-Marco and J. L. Navarro. A closed-loop exponential feeding law for multi-substrate fermentation processes. In *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, pages 9685–9689, 2008.

[11] M. M. Schuler and I. Marison. Real-time monitoring and control of microbial bioprocesses with focus on the specific growth rate: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 94(6):1469–1482, 2012.

[12] Z.I.T.A. Soons, J.A. Voogt, G. van Straten, and A.J.B. van Boxtel. Constant specific growth rate in fed-batch cultivation of *Bordetella pertussis* using adaptive control. *Journal of Biotechnology*, 125(2):252 – 268, 2006.

[13] A. Vargas, J.A. Moreno, and A. Vande Wouwer. A weighted variable gain super-twisting observer for the estimation of kinetic rates in biological systems. *Journal of Process Control*, 24(6):957 – 965, 2014.

[14] A. Vignoni, S. Nuñez, H. De Battista, J. Picó, E. Picó-Marco, and F. Garelli. Specific kinetic rates regulation in multi-substrate fermentation processes. In *Preprints of the 12th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology*, pages 48 – 53, 2013.

[15] Jun Xu, Baohua Guo, Zengmin Zhang, Qiong Wu, Quan Zhou, Jinchun Chen, Guoqiang Chen, and Guodong Li. A mathematical model for regulating monomer composition of the microbially synthesized polyhydroxyalkanoate copolymers. *Biotechnology and Bioengineering*, 90(7):821–829, 2005.

[16] M. Zinn, B. Witholt, and T. Egli. Dual nutrient limited growth: models, experimental observations, and applications. *Journal of Biotechnology*, 113(1):263 – 279, 2004.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

LOCALIZACIÓN DE OBJETOS 3D CON AMBIGÜEDAD DE VISTA EN TAREAS DE GUIADO ROBÓTICO

Carlos M. Mateo, P. Gil, F. Torres
Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial
Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
Universidad de Alicante
{cm.mateo, pablo.gil, fernando.torres}@ua.es

Resumen

Este artículo describe un método para reconocimiento 3D y recuperación de la pose en 6 grados de libertad de objetos volumétricos con ambigüedad de vistas. Típicamente, estos objetos son figuras regulares, de revolución o tetraedros, con escasa información geométrica por ausencia de aristas, además de nula información de textura y color. El objetivo, por lo tanto, es conseguir una monitorización y supervisión de las tareas de guiado de un robot manipulador en ausencia de marcas y tomando como referencia la vista 3D del objeto.

Palabras clave: Reconocimiento objetos 3D, recuperación pose, descriptores de superficie, modelos geométricos.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, gracias a la aparición de sensores RGBD, tales como Microsoft Kinect o Asus Xtion PRO, y librerías software [6] que aglutinan algoritmos de visión por computador 3D, los procesos de reconocimiento de objetos basados en técnicas de visión por computador 3D han sufrido un rápido crecimiento. Este crecimiento hace plausible realizar tareas de guiado robótico mediante visión en entornos no estructurados, con ausencia de marcas en los objetos y/o en el entorno. La visión por computador, en robótica, no es solo útil en problemas de *Localización Y Mapeado Simultáneos* (SLAM), control visual (visual servoing), también toma relevancia en problemas de manipulado de objetos en entornos domésticos e industriales (típicamente, los entornos industriales son entornos estructurados).

El problema de reconocimiento y guiado robótico mediante visión por computador para el agarre y manipulado de objetos, ha sido ampliamente estudiado. Torgerson E., *et al.* [9], presentó de manera experimental los beneficios de la visión por computador aplicada al guiado de robots de manipulación en entornos industriales. Posteriormente Smith, C.E, *et al.* [7] presentó mecanismos de sensorizado de sistemas robóticos, en concreto hace especial énfasis en los sistemas de visión para sistemas robóticos que tienen como propósito el agarre de objetos. Recientemente, Zhang, B., *et al.* [5] y Nilsson, P., *et al.* [11] describieron los beneficios del uso de técnicas de visión 3D y el uso de cámaras estéreos no calibradas, respectivamente.

A diferencia de los trabajos anteriormente citados, siguiendo la propuesta del trabajo [3] en este artículo se propone un sistema de reconocimiento y supervisión de la tarea de guiado de un brazo robótico, Mitsubishi PA-10, en un entorno semi-estructurado (tipo de objeto y localización desconocido). El extremo del robot está equipado con un sensor RGBD, Microsoft Kinect. Los objetos a ser detectados son figuras geométricas simples, de pocas caras: cubo, cilindro, cono, esfera y prisma triangular. Los objetos que se utilizan en la experimentación han sido construidos, con las nuevas impresoras 3D, a partir de modelos CAD los cuales han sido usados para entrenar el sistema en un proceso off-line previo. Además, se combinan técnicas de reconocimiento 3D [1] más apropiadas y actuales para realizar guiado en relación a precisión/tiempo [2].

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se comenta el proceso de reconocimiento y estimación de pose. En la sección 3, se presenta el método propuesto para alcanzar dicho objetivo. Los resultados experimentales del método son descritos en la sección 4. Finalmente, la sección 5, contiene las conclusiones.

2. RECONOCIMIENTO. CLASIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE POSE

El reconocimiento y estimación de la pose de objetos mediante visión artificial es un proceso crítico en un sistema de supervisión de guiado robótico. Por un lado, dependiendo del nivel de precisión del sistema de reconocimiento, el guiado se hace más o menos robusto. Por otro lado, dependiendo del tiempo de cómputo del proceso de reconocimiento y estimación de pose, es posible diseñar sistemas de guiado más o menos reactivos en tiempo real.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 1: Descripción de símbolos.

Nombre	Descripción
p	Punto en el espacio Euclídeo xyz
q	Punto p de referencia
P	Conjunto de p de una imagen 3D
P^*	Subconj. de p de una imagen 3D
C	Subconj. de los p más cercanos a q
H	Histograma de un subconjunto C
R	Roll Histograma asociado a un C
T_{S1}^{S2}	Transformación de base $S1$ a $S2$

En la literatura actual referida a la visión por computador 3D, predominan dos procesos de reconocimiento, aquellos basados en características locales 3D y otros basados en características globales 3D [1]. Los procesos de reconocimiento locales son procesos en los que se procesan las características locales a cada p en la nube de puntos o conjunto de puntos P de una imagen, con respecto a una ventana o entorno de vecindad de tamaño k o radio r, con lo que conlleva complejidades del orden de $O(nk)$, siendo n el número total de puntos, en el peor de los casos $O(n^2)$. En cambio los procesos de reconocimiento globales son procesos en los que se procesan las características globales a la nube de puntos P, siendo en el peor de los casos complejidades del orden de $O(n)$. Por lo tanto, el reconocimiento global es el más apropiado para tareas de reconocimiento y localización de guiado robótico, siendo este más rápido, por su menor complejidad computacional. Por contra, el proceso de reconocimiento global pierde capacidad de reconocimiento frente al reconocimiento local. Éste criterio es menos preciso y genera ambigüedades ante objetos de formas similares: pocas caras, objetos de revolución, sin contraste ...

Puesto que a lo largo del artículo se trabaja con el proceso de reconocimiento global a no ser que se diga lo contrario se utilizará solo el término *reconocimiento* para referirse a él. En esta sección se describe de manera general las etapas de las que está compuesto el reconocimiento.

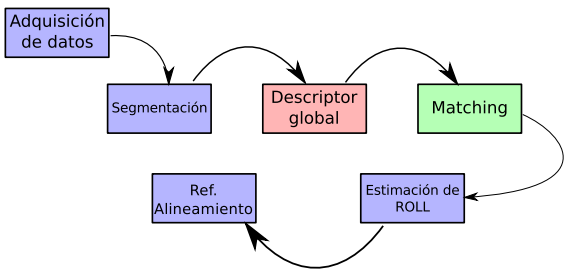


Figura 1: Proceso de reconocimiento global 3D

2.1. CLASIFICACIÓN

El primer paso, en la recuperación de la pose de un objeto, requiere de una etapa de clasificación de los objetos en función de su tipología o forma geométrica. Para ello se realizan los siguientes etapas: segmentación, extracción de descriptor y, por último, el emparejamiento (*matching*).

2.1.1. Segmentación

El objetivo de esta etapa es separar los objetos del plano dominante, sobre el que apoyan los objetos (ecuación 1) y agruparlos (ecuación 2), ya que deben extraerse características aisladas por cada objeto dentro de la escena a analizar e interpretar.

Por lo tanto, primero, se realiza la separación de los objetos del plano, en la literatura existen diversos mecanismos, desde mecanismos simples como un filtro paso banda, donde se conoce la situación espacial de los objetos dentro de la escena, hasta la extracción del plano dominante por medio de métodos iterativos de búsqueda de mínimos cuadrados, como puede ser RANSAC.

$$P^* \subseteq P \quad = \quad \{\exists p \in P \mid p \notin plano\} \qquad (1)$$

Segundo, se realiza el agrupamiento por regiones de cercanías. Las regiones de cercanías se pueden estimar en base a diversos criterios, distancia Euclídea, distancia de las normales a un punto, distancia de color, etc. La idea fundamental es conseguir un conjunto de $\{C_1, C_2, \ldots, C_m\}$, donde m es el número de clusters que cumplen con las ecuación 2 y 3.

$$C_i \subseteq P^* \quad = \quad \{\exists p \in P^* \mid d\,(p^*, q_i) < \alpha\} \qquad (2)$$

$$\|C_i\| \quad \geq \quad \beta \qquad (3)$$

en la que $d\ (p, q)$ es la distancia, independientemente del criterio, de un punto a otro, α es la distancia máxima de tolerancia para pertenecer a un cluster u otro, y β es el tamaño mínimo de un conjunto para considerarse cluster. Estas tolerancias son fijadas de manera empírica. En la sección 3.2 se muestran los valores que mejor se ajustan para este trabajo.

2.1.2. Descriptor global

Esta etapa es crítica en el reconocimiento, pues determina lo preciso y rápido que es el reconocimiento. En la literatura existen multitud de descriptores, de distinta naturaleza (sin tener en cuenta información de color). Las piezas (objetos) con los que se trabaja en este articulo tienen el mismo color y distinta forma.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Por un lado están los descriptores basados en normales, como pueden ser VFH (Histograma de características según punto de vista) [1] y CVFH (Histograma de características de clustes según el punto de vista) [1], o GSHOT (Firmas de histogramas de orientaciones globales) [8]. Por otro lado, están los descriptores basados en vóxel para representar la superficie, como son SDVS (distribución de la figura en un vóxel de superficie) [10], ESF (Ensamblado de funciones de superficie) o GRSD (Descriptor global de superficie basado en radio) [1].

Como finalidad esta etapa genera un H (histograma de características) por cada uno de los C_i en la escena, por lo que se generan m histogramas.

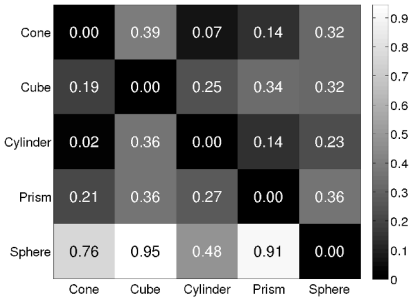


Figura 2: Matriz de distancia que genera CVFH con una base de objetos ambiguos y con la métrica lineal de Manhattan como medida de similitud (extraído de Mateo, C.M., *et al.* [2]). Las filas son los modelos y las columnas las escenas(objetos)

En trabajos previos [2], se observa que el descriptor más apropiado, en relación precisión tiempo, para reconocer un conjunto de objetos con ambigüedad de formas es CVFH, con la precisión que muestra la Figura 2. CVFH es un descriptor que extiende VFH, de tal modo que CVFH extrae un histograma de caracteristicas VFH por cada región estable. Las regiones estables se consiguen eliminando los puntos de las aristas, y conjuntos de puntos con bajo número de vecinos en su entorno, alejados de la homogenidad de las superficies. El histograma VFH está compuesto por dos componentes, una que contiene la información relativa a la superficie, SPFH [1], y la otra, componente que contiene la información del punto de vista desde donde se observa la superficie.

2.1.3. Emparejamiento (*Matching*)

Para realizar el matching se crea una estructura de árbol k-dimensional en donde se organizan los histogramas de los modelos con los que previamente el sistema ha sido entrenado. Por lo tanto, el emparejamiento con el modelo que genera menor distancia con H_i es el que determina el tipo de objeto del C_i, asumiendo siempre que no se encuentran en la escena objetos desconocidos, que no están en la base de datos del aprendizaje.

En este artículo, con el objetivo de realizar un sistema lo más rápido posible, el emparejamiento solo se realiza en la dirección modelo-escena (y no viceversa). El sistema sería más robusto aunque más lento si el proceso de correspondencia se hiciera mínimizando el emparejamiento modelo-escena y escena-modelo. También, debe de tenerse en cuenta la selección de la métrica a utilizarse para calcular la distancia entre modelo-escena, puesto que se está utilizando una estructura de árbol k-dimensional, la métrica utilizada debe ser lineal. Debido a los resultados obtenidos en el trabajo [2] se determina que la medida de distancia óptima para reconocer un conjunto de objetos ambiguos es $L1$ (distancia de Manhattan). Otras distancias y matrices de similitud empeoran los resultados de matching en objetos reales aunque no con virtuales.

2.2. RECUPERACIÓN DE POSE

Una vez el objeto C_i ha sido clasificado se determina el alineamiento del objeto. Para esto se utilizan dos etapas. En la primera, se recupera la orientación en el eje Z y en la segunda se realiza un refinamiento del alineamiento (ver Figura 3 y 5).

2.2.1. Estimación de Roll

Los descriptores de características globales son independientes a giros sobre el eje Z, ya que éstos solo tienen 5 grados de libertad para describir la superficie y pose de un objeto. Para resolver este problema se genera un histograma de apoyo llamado CRH (Histograma del Roll de la cámara) tal y como se emplea en [1].

2.2.2. Refinado del alineamiento

Con el fin de conseguir un alineamiento modelo-escena, adecuado, y de este modo obtener la información relativa a la localización y orientación del objeto con respecto a la cámara, esta etapa busca la minimización del error del alineamiento entre modelo y objeto en la escena mediante la aplicación del algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) ampliamente conocido en técnicas de SLAM.

3. MÉTODO

El método presentado en este artículo está compuesto de dos partes. La primera parte se realiza de manera off-line y se denomina entrenamiento. La segunda parte es la encargada del reconoci-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

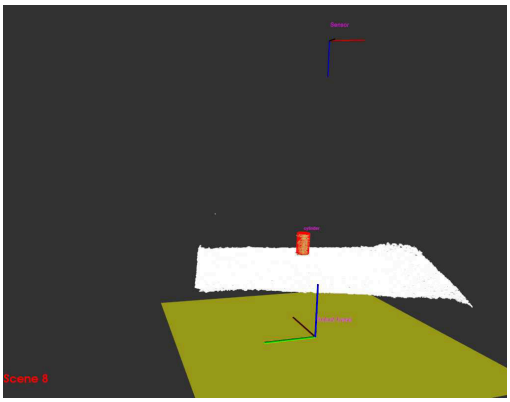


Figura 3: Sistema de reconocimiento tras detectar un objeto en la escena

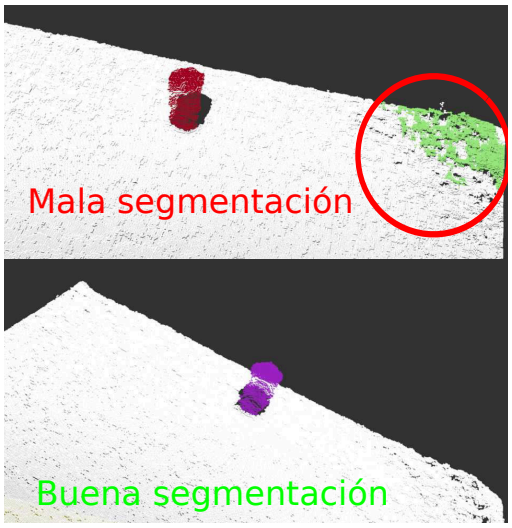


Figura 4: Segmentación de objetos del plano dominante con errores.

miento y es ejecutada on-line, por lo que es denominada reconocimiento. En la Figura 3, se puede observar la detección de un objeto por el sistema una vez aplicada las etapas del proceso de reconocimiento.

3.1. ENTRENAMIENTO

El sistema se entrena a partir de un conjunto de objetos CAD de entrada, llamados modelos. Primero, para ese conjunto de objetos CAD se genera un conjunto de vistas virtuales. Estas vistas se generan a partir de una ico-esfera de radio r, formada por 80 polígonos. La cámara virtual que genera las vistas virtuales se sitúa en los vértices de estos polígonos, teniendo por lo tanto 42 vistas por cada uno de los modelos. Simultáneamente a la generación de las vistas, se almacenan las poses del objeto CAD relativas a cada vista tomada con la camara virtual. Segundo, para cada una de las vistas generadas anteriormente se calculan y almacenan los histogramas CVFH correspondientes, a la vez que los histogramas que almacena el giro en Z de la cámara virtual, CRH.

3.2. RECONOCIMIENTO

Una vez, el entrenamiento se ha realizado, el sistema está dispuesto para realizar el reconocimiento on-line.

Inicialmente, se aplica un proceso de segmentación. La segmentación permite separar objetos del plano donde se apoyan (plano dominante) y del resto de información no relevante de la escena, mediante agrupado. Asumiendo que no hay objetos desconocidos (no coincidentes con los modelos) en las escenas y que de estos ninguno tiene una altura inferior a los 5mm (el modelo CAD más bajo es el cubo, con una altura de 70mm), se establece como umbral de separación entre objetos y plano dominante este valor. En la Figura 4, se observa qué sucede cuando no se establece una altura mínima de objeto. Estos errores se deben a los sensores RGBD de bajo coste, que producen errores en la captura de imágenes.

El segundo paso es el cálculo del descriptor de características de los objetos en las escenas. Se utilizan los mismos umbrales para el cálculo de los descriptores de características en las escenas que para el cálculo previo de las vistas de los modelos. Hay dos umbrales críticos en el cálculo del descriptor, el ángulo máximo para determinar si un punto pertenece a un borde (determinado por la ecuación 4) y el tamaño mínimo para considerarse un cluster. Para el primer umbral, empíricamente se ha demostrado que $\cos(\frac{\pi}{8})$ es un valor apropiado para separar bordes de figura tetraédricas sin erosionar las superficies curvas de las figuras de revolución. Para el segundo umbral, también de manera empírica se determina que el valor más apropiado es el $0{,}15 \cdot sizeof(C_i)$.

$$\cos\theta \quad \leq \quad \frac{U \cdot V}{\|U\|\|V\|} \tag{4}$$

El tercer paso es la búsqueda de la vista de los modelos que mejor emparejamiento realiza con los objetos en la escena. Como se describe en la sección 2.1.3, se utiliza una estructura de árbol k-dimensional, en concreto se utiliza la estructura KdTreeFLANN implementada por Muja, M., *et al.* [4] haciendo uso de la distancia métrica $L1$.

El cuarto paso es generar el histograma de giro sobre el eje Z de la cámara (CRH, histograma que guarda el ángulo de rotación de las normales de cada punto del conjunto) del objeto reconocido en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la escena. Después, se alinea con la vista del modelo seleccionado en la etapa anterior. La forma de alinearlo es haciendo coincidir los picos (máximo valor de histográma) de ambos CRH, modelo y escena, de esa manera se consigue recuperar la rotación sobre el eje Z que se ha producido en la escena para ser alineada con la vista seleccionada.

El quinto paso es el refinamiento del alineamiento de la vista del modelo seleccionada con la vista del objeto en la escena mediante el algoritmo ICP. Los parámetros pasados a ICP son el número máximo de iteraciones, siendo en este método 20, y el error máximo permitido, siendo 0.0001. Ambos parámetros han sido ajustados de forma empírica.

Un último paso que se realiza es el cambio de base de la transformación detectada por el sistema de reconocimiento, pasando de la base del sistema de la cámara a la base del sistema del robot donde se encuentra la cámara (ecuación 5).

$$T_{baseR}^{Obj} = T_{baseR}^{extRobot} \times T_{extR}^{Sens} \times T_{Sens}^{Obj} \quad (5)$$

4. EXPERIMENTOS

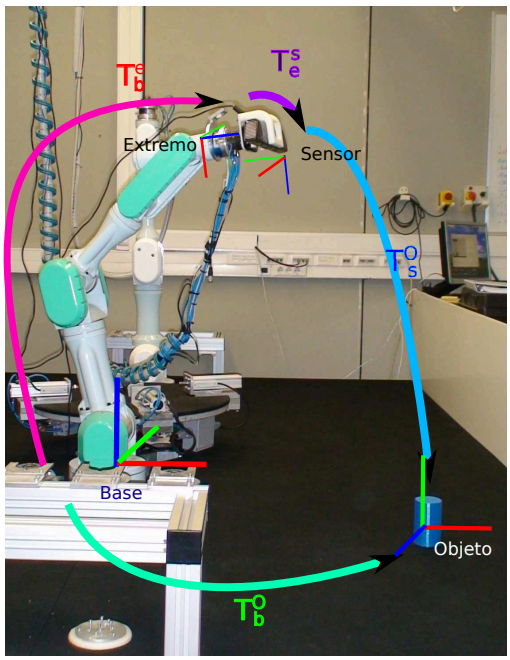


Figura 5: Robot Mitsubishi PA-10 con sensor RGBD montado en su extremo.

Para realizar la experimentación se ha utilizado un robot Mitsubishi PA-10 equipado en su extremo con un sensor RGBD Microsoft Kinect (Figura 5). Como objeto de muestra en la escena se ha puesto un cilindro generado con una impresora 3D a partir del modelo CAD cilindro de la base de entrenamiento. Como base de entrenamiento se han utilizado los modelos utilizados en trabajos previos [2].

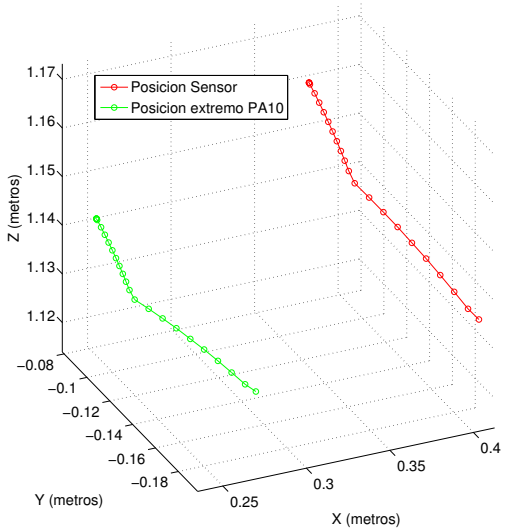


Figura 6: Trayectorias del extremo del robot PA-10 y de la cámara Kinect.

Con la finalidad de asegurar que el sensor no sufra ningún tipo de balanceo y está bien anclado se han calculado las trayectorias del extremo del robot y del sensor RGBD. Los resultados de este análisis pueden observarse en la Figura 6 donde se puede observar que la trayectoria verde (extremo del robot) es paralela a la trayectoria roja (sensor RGBD). La transformación $T_{extRobot}^{Sensor}$ se mantiene.

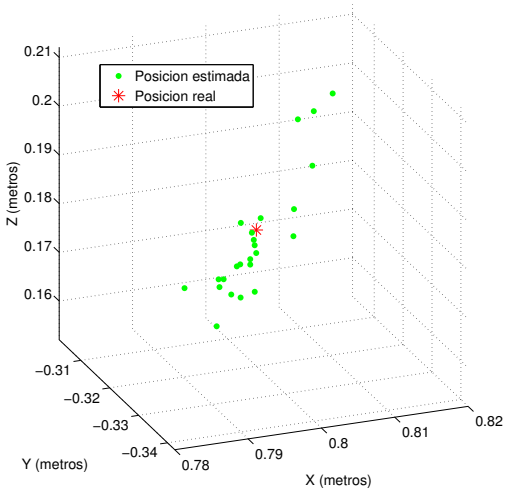


Figura 7: Error en posición del sistema. En rojo se encuentra la posición real, en verde las posiciones estimadas.

Se han seleccionado 24 frames a ser analizados dentro de la trayectoria mostrada en la Figura 6. De los cuales se ha analizado el error producido en la recuperación de posición del objeto-cilindro

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

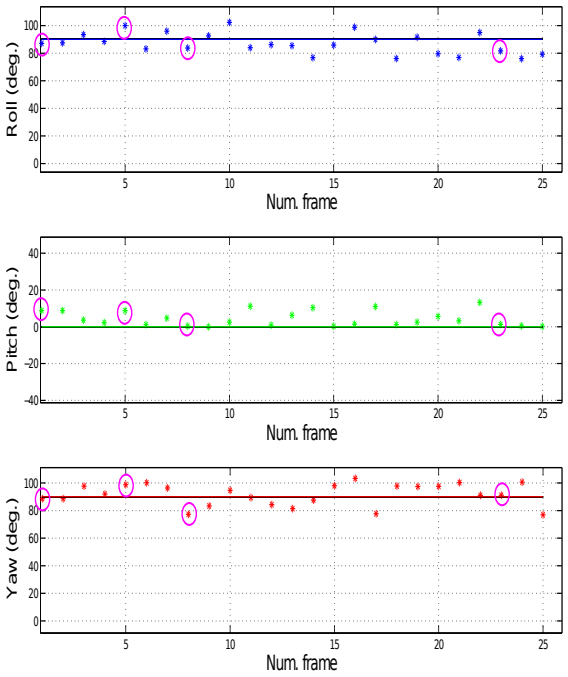


Figura 8: Error en orientación del sistema. Desde arriba hacia abajo, rotación sobre el eje Z, sobre el eje Y, sobre el eje X. Las lineas representan las orientaciones reales del objeto y los puntos las orientaciones estimadas.

(Figura 7) y el error que se produce en la recuperación de la orientación de éste (Figura 8).

El error máximo en posición según se observa en la Figura 7 se produce en el eje de coordenadas Z, siendo este de 15mm. Este error viene dado por el umbral seleccionado en el paso de segmentación del reconocimiento, que erosiona todos los puntos entre el plano y 5mm de altura.

Puesto que los modelos CAD de los objetos han sido diseñados de manera que yacen sobre el eje Y y que el orden de giro es *roll*, *pitch* y *yaw*, las rotaciones en el caso del cilindro sobre el eje Y no afectan al resultado final de la orientación. Los resultados de orientaciones obtenidos (Figura 8) para los otros dos ejes han sido convertidos entre 0 y 90 grados, puesto que en ocasiones los ángulos de rotación obtenidos eran redundantes múltiplos de 90. Esta redundancia se debe a la simetría de la figura, ya que una rotación sobre el eje Z o X múltiplo de 90 grados produce el mismo resultado que aplicando una rotación de 90 grados.

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran una buena aproximación en el proceso de monitorizado y reconocimiento de vistas de objetos en tareas de guiado robótico. El error en posición es del 6,6 %, ya que la altura del

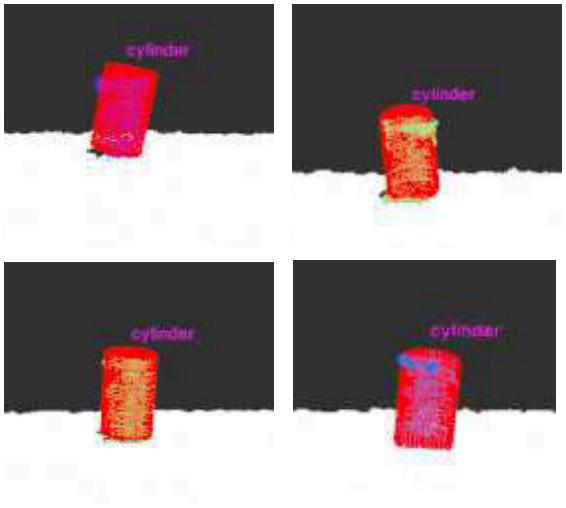


Figura 9: Secuencia de escenas (frames) del proceso de reconocimiento. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, Frame 0, 5, 8 y 23.

cilindro es de 150mm y el error en posición máximo obtenido en el eje Z es de 10mm (se corrigen los 5mm eliminados en la etapa de segmentado).

El error en posición y orientación (localización) puede ser reducido, aumentando el número de iteraciones y reduciendo el umbral de error permitido en el algoritmo ICP en la etapa de refinado del alineamiento. Los cambios de estos umbrales conlleva un aumento considerablemente del tiempo de computo en el proceso de reconocimiento.

Estos resultados son dependientes de los objetos a reconocer, ya que cuando más simple y ambigua sea la forma de los objetos a reconocer, mayor dificultad añade al reconocimiento y por lo tanto más tiempo y peor resultados se obtienen. Los resultados mostrados para el cilindro son extrapolables a otras figuras simples.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio Español de Economía, Fondos Europeos FEDER y el Gobierno Regional Valenciano, a través de los proyectos DPI2012-32390 y PROMETEO/2013/085.

Referencias

[1] Aldoma, A., and et al., (2012) Tutorial: Point Cloud Library: Three-Dimensional Object Recognition and 6 DOF Pose Estimation., IEEE Robot. Automat. Mag., pp 80-91.

[2] Mateo, C.M., and et al., (2014) A Performance Evaluation of Surface Normals-Based Descriptors for Recognition of Objects using

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CAD-Models., 11ht International conference on informatics in control, automation and robotics (ICINCO), Vienna, Austria.

[3] Mateo, C.M., and et al., (2014) Geometric object recognition in image for grasping, International International Computer Vision Summer School (ICVSS), Sicilia, Italia.

[4] Muja, M., and Low., D.G., (2009) Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. nternational Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP). Lisboa, Portugal.

[5] Nilsson, P., (2010) 3D-Vision Guided Robotics for Material Handling., 41st International Symposium on Robotics (ISR), Munich, Germany.

[6] Rusu, R.B., and Cousins, S., (2011) 3D is here: Point Cloud Library (PCL), IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China.

[7] Smith, C.E., and Papanikolopoulos, N.P., (1996) Vision-guided robotic grasping: issues and experiments., IEEE International Conference on Robotics And Automation, Mineápolis, EEUU.

[8] Tombari, F., and et al., (2010) Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description., Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision Conference on Computer Vision: Part III (ECCV), Heraklion, Greece.

[9] Torgenson, E., and Paul, F.W., (1988) Vision-guided robotic fabric manipulation for apparel manufacturing., IEEE Control Systems Mag., pp 14-20.

[10] Wohlkinger, W., and Vincze, M., (2011). Shape distributions on voxel surfaces for 3d object classification from depth images., IEEE ICSIPA, pp 115-120.

[11] Zhang, B., and et al., (2011) Vision-guided robotic assembly using uncalibrated vision., International conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

INTEGRACIÓN DE RECONOCIMIENTO DE ESCENAS Y LOCALIZACIÓN BASADA EN MONTE CARLO

Javier Pérez, Luis Merino
Universidad Pablo de Olavide, Crta. Utrera km1, E-41013, (Sevilla), {*jiperlar,lmercab*}*@upo.es*

Fernando Caballero
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, E-41092, (Sevilla), *fcaballero@us.es*

Resumen

Este trabajo propone la extensión del algoritmo de Localización Monte Carlo con información visual para conseguir un sistema de localización a largo plazo, capaz de funcionar de forma ininterrumpida sin necesidad de injerencia humana, en entornos no necesariamente planos y muy concurridos, donde los láseres 2D pueden no resultar suficientes para obtener la localización del robot en el mapa. Nuestra propuesta emplea el reconocimiento de escenas para determinar si el robot se encuentra perdido y permitirle la relocalización. Este artículo presenta resultados experimentales basados en datasets tomados con el robot FROG en escenarios complejos.

Palabras clave: Localización, Monte Carlo, Bag of Words, Place recognition, Long-term localization.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo descrito en este artículo es fruto de parte de las tareas enmarcadas en el proyecto FROG[1], consistente en el desarrollo de un robot guía para entornos turísticos con zonas de exterior e interior. El uso de robots guías se lleva estudiando desde hace más de una década [1], sin embargo, nuestro proyecto considera una nueva contribución al desarrollar comportamientos sociales y su adaptación ante las reacciones de las personas con las que interactúan. Pretendemos demostrar la capacidad de navegar y localizarse durante largos periodos de tiempo en el Zoo de Lisboa y el Real Alcázar de Sevilla.

Navegar en estos escenarios tan concurridos (el Real Alcázar de Sevilla recibe más de 5000 visitas diarias de media) requiere un algoritmo de localización muy robusto. Conseguir una localización que funcione en largos periodos de tiempo conlleva distintos retos, como operar en entornos variantes, la recuperación ante errores de localización, reconocimiento eficiente de lugares, etc. teniendo en cuenta las variaciones de iluminación, así como los efectos meteorológicos. Los escenarios de trabajo presentan por tanto una alta variabilidad con oclusiones parciales de los sensores, debido a los turistas, lo que podrá causar problemas en los sistemas tradicionales de localización basados en mapas usando las mediciones del láser y la odometría [2].

Las implementaciones de "scan matching" basadas en láseres 2D son los métodos de localización más extendidos debido a su alta precisión comparada con otros sensores y su bajo coste computacional en comparación con los sensores visuales [3]. Estos algoritmos hacen unos de mapas geométricos y "scan matching" para estimar la nueva posición del robot a partir de las anteriores y la odometría. Los algoritmos de "scan matching" puede trabajar con pequeñas variaciones en el entorno, tales como cambios en el estado de puertas, pero puede verse empobrecido su funcionamiento cuando existen grande variaciones, como escenarios muy concurridos y escenarios dinámicos como el Zoo de Lisboa y el Real Alcázar de Sevilla, donde los visitantes pueden acercarse y rodear al robot movidos por la curiosidad o mientras están siendo guiados.

Distintas aproximaciones han sido consideradas para mejorar la robustez de la localización, Hentschel y Wagner [4] y Dayoub y Duckett [5] presentan en sus trabajos representaciones del entorno para robots móviles autónomos que se adaptan continuamente en el tiempo, inspiradas en la memoria humana guardando el conocimiento del entorno actual y pasado, usando memoria del sensor y memorias a corto y largo plazo.

Algoritmos de detección online de cierres de bucles basados en reconocimiento visual como OpenFabMap2 [6], DLoopDetector [7], y otros [8] que usan estructuras basadas en Bag-of-Words [9] han sido presentados para detectar lugares revisitados, resultando de gran ayuda para la recuperación de errores en localización. Corke et al. [10] aporta un algoritmo para obtener imágenes invariantes para localización a largo plazo. En él describen cómo convertir imágenes en color a diferentes horas del día en exteriores a imágenes en tonos grises inva-

[1] http://www.frogrobot.eu

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

riantes eliminando el efecto de las sombras.

Estos algoritmos visuales pueden ser fácilmente usados para proveer nuevas hipótesis de localización a las tradicionales técnicas basadas en el uso de otras modalidades sensoriales, como láseres 2D. Estas nuevas hipótesis pueden mejorar la robustez del sistema de localización. En este artículo proponemos un sistema basado en el Filtro de Monte Carlo alimentado con nuevas partículas obtenidas a través de reconocimiento visual de entornos, permitiendo recuperaciones de posibles errores en localización en combinación a la alta fiabilidad de los láseres en los procesos de relocalización.

El artículo se estructura de la siguiente manera: la siguiente sección describe la plataforma robótica usada para las pruebas. La Sección 3 presenta cómo la referencia de posición de los experimentos fue obtenida para construir el mapa y comprobar el algoritmo descrito en la Sección 4 para localización a largo plazo. El artículo termina con la Sección 5 detallando los experimentos hechos y resultados obtenidos y las conclusiones y futuras lineas a seguir en la Sección 6.

2. PLATAFORMA ROBÓTICA

La Fig. 1 muestra a FROG durante una demostración en el Zoo de Lisboa. El robot consiste en una plataforma móvil, con 4 ruedas adaptadas a los escenarios considerados. Tiene una autonomía de entre dos y cuatro horas, dependiendo del tipo de superficie de movimiento así como del número de PCs de a bordo funcionando a la vez (hasta tres). El robot pesa 80Kg aproximadamente y su máxima velocidad es de 1.6 m/s (limitación software a 0.8 m/s).

El robot está equipado con un amplio rango de sensores para propósitos de seguridad, localización y navegación. Entre ellos, los siguientes sensores son considerados para la localización y navegación:

- La odometría es calculada mediante los encoders de las ruedas y las velocidades angulares obtenidas de una IMU MTi-G de XSense.
- Tres lasers son empleados: dos horizontalmente para obtener mediciones frontales y traseras para localización y evitación de obstáculos y un tercero con cierta inclinación para percepción 3D de obstáculos en la dirección de avance del robot, permitiendo discernir si una rampa es navegable o no, ya que los láseres horizontales podrían detectarlas como obstáculos.
- Un par estéreo, para la detección de personas, estimación de posición del robot y percepción 3D del entorno.

Figura 1: Arriba: robot FROG. Plataforma desarrollada y ubicaciones de los sensores. Abajo: par estéreo en los ojos del robot y pantalla táctil. La pantalla muestra la estimación de las personas detectadas por el par estéreo.

- Una cámara adicional para determinar expresiones y estados de ánimo de las personas que interactúen con el robot.

3. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA

Para probar el algoritmo propuesto es necesario generar un mapa de navegación de alta precisión. Los experimentos reales mostrados en este artículo fueron llevados a cabo en el Zoo de Lisboa. Tratándose de una zona parcialmente fuera de cobertura GPS, debido a la existencia de zonas cubiertas dentro del recorrido, resulta necesario emplear técnicas de SLAM para construir un mapa preciso.

La aplicación considerada permite una solución SLAM offline: se pueden almacenar datos en la zona y con ellos construir un mapa offline (se necesitará de un tratamiento del mapa para añadir futuros cambios en el entorno). En consecuencia, el mapa es obtenido mediante la resolución offline del problema completo de SLAM, consistiendo en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

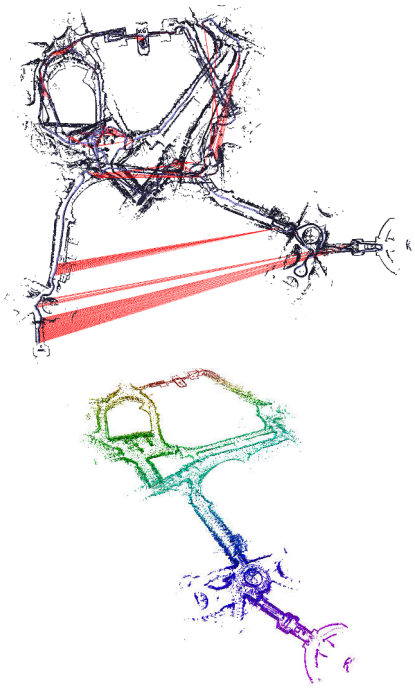


Figura 2: Arriba cierres de bucles en el Zoo de Lisboa (las líneas rojas marcan las zonas revisitadas). Se aprecia típica deriva asociada a la odometría. Abajo Point Cloud en el Zoo de Lisboa. Las alturas están codificadas en colores (el rojo indica la mayor altura).

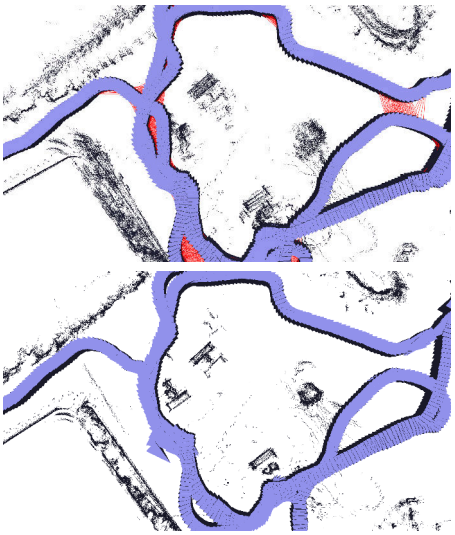


Figura 3: Arriba: mapa obtenido mediante la proyección de la información con la posición optimizada del robot. Las líneas rojas se refieren a la detección de cierres de bucles. Abajo: refinamiento del mapa tras considerar la información de los láseres en el proceso de optimización. Puede verse cómo la vegetación y los árboles son alineados correctamente.

la obtención del mapa y de la completa trayectoria del robot dando todas las mediciones sensoriales disponibles.

El problema full-SLAM puede entenderse como un problema de minimización no lineal de mínimos cuadrados, en el que la información sensorial proporciona restricciones entre las diferentes variables del problema, típicamente las posiciones del robot y las posiciones de los elementos del mapa. La minimización no lineal es llevada a cabo por el *SLAM back-end*. La técnica empleada en este artículo es *g2o* [11], que requiere una estimación inicial de los valores de todas las variables, así como las restricciones entre ellos, codificadas como un grafo (o un hipergrafo).

Este grafo es generado por el *SLAM front-end*. En nuestro caso, resolvemos el problema *pose-SLAM*, donde sólo la trayectoria del robot es recuperada por el *SLAM back-end*. Nuestro interfaz considera la odometría y los cierres de bucles proporcionados por el algoritmo OpenFabMap2 [6] sobre las imágenes para proporcionar las restricciones en las variables de estado, en este caso las posiciones del robot.

Tras la ejecución de la anterior minimización se obtiene una trayectoria óptima corregida del robot. Esta trayectoria se usa para generar el mapa a partir de las mediciones de los sensores. Así, un mapa 2D o 3D puede ser construido con las mediciones de los láseres y del sistema stereo. La Fig. 2 muestra el mapa 3D generado mediante el láser para una trayectoria de 1,4 km. en el Zoo de Lisboa. Se ve como la divergencia de la odometría distorsiona el mapa con respecto a su forma real y como la detección de cierres de bucles permite refinar el mapa y obtener una estimación consistente de la posición global.

No obstante, mientras la trayectoria del robot es globalmente consistente, la proyección de datos (láseres, nubes de puntos o datos estereo) en el sistema de referencia global conducirá a mapas con errores locales, como paredes poco definidas o dobles, debido a que la información de los sensores no fue considerada en la minimización. Por tanto, un procedimiento final es empleado para optimizar el mapa resultante. Los pasos seguidos fueron: Se obtuvo un nuevo set de restricciones mediante el emparejamiento de medidas de láser o nubes de puntos. Como una buena estimación inicial de la posición del robot está aún disponible de la solución inicial, el proceso de emparejamiento entre láseres es realizado no sólo entre posiciones consecutivas, sino entre posiciones cercanas en el espacio pero no en el tiempo. A continuación las posiciones son refinadas mediante la minimización de una función de errores para esas restricciones que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

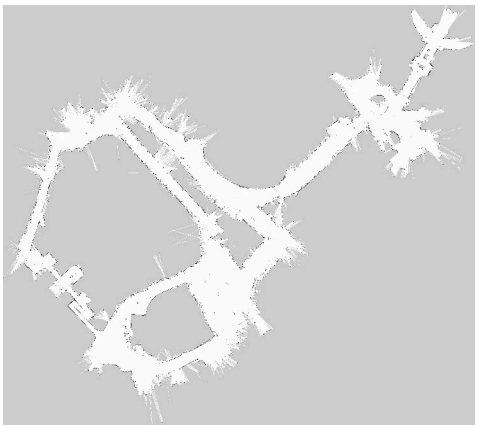


Figura 4: Occupancy grid map resultante del Zoo de Lisboa tras la integración de las medidas 2D de los láseres.

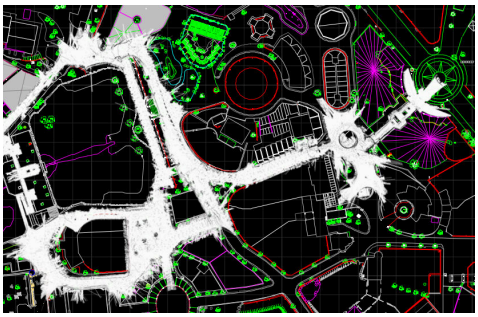


Figura 5: 2D occupancy map del Zoo de Lisboa superpuesto a un mapa CAD del mismo.

dependen de la calidad de alineamiento de láseres.Y por último la semilla inicial para la minimización es obtenida de la solución previa.

La Fig. 3 muestra un ejemplo de este refinamiento. En la Fig. 4 se ve el mapa resultante tras la integración de mediciones láser 2D. Una comparación entre este mapa y el mapa CAD es mostrado en la Fig. 5. El robot hizo una exploración completa de la zona navegable para la generación del mapa, adquiriendo datos con ambos láseres (frontal y trasero). Como se ve en la Fig. 4, los obstáculos no permanentes, como personas, son eliminados debido a la integración de información durante la construcción del mapa, situación similar con las rampas, que también resultan eliminadas en el mapa final.

4. ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN A LARGO PLAZO

4.1. Algoritmo Base de Localización

El módulo de localización provee la posición del robot en 6D al resto de módulos en ejecución. Se emplea un algoritmo de localización basado en mapa, así la posición del robot está referida al sistema de dicho mapa. En particular, empleamos un Algoritmo de Localización de Monte Carlo (MCL) [12]. Los Filtros de Partículas son muy flexibles en la representación de distribuciones de probabilidad arbitraria y permiten la fusión de información sensorial proveniente de distintas fuentes, que resulta relevante para el método descrito en este trabajo.

La localización del robot 6DOF es representada mediante $\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} x & y & z & \gamma & \varphi & \theta \end{bmatrix}^T$, donde la orientación es descrita por los ángulos roll (γ), pitch (φ) y yaw (θ). Sin embargo, al considerar un robot móvil terrestre, éste está limitado a una navegación 2D en escenarios reales. Por esto, la coordenada z es dependiente de las otras x e y en el map M. Además, la IMU incorporada en la plataforma, proporciona una solución estable para la estimación de γ y φ mediante el uso de filtros internos. Para reducir el espacio de estados requerido por las partículas, consideramos un Filtro Rao-Blackwellized [13], en el que la pose 2D actual $\begin{bmatrix} x & y & \theta \end{bmatrix}^T$ es obtenida mediante el filtro y la altura z mediante un Filtro de Kalman (recordando que los ángulos roll y pitch son proporcionados por la IMU).

La distribución de probabilidad de la posición del robot es representada por un conjunto de partículas con pesos ω: $\langle x_t^{[i]}, y_t^{[i]}, \theta_t^{[i]}, \bar{z}_t^{[i]}, \sigma_{z,t}^{[i]}, \gamma, \varphi, \omega^{[i]} \rangle$. Estas partículas son actualizadas mediante la información proveniente de las mediciones odométricas y las lecturas del láser del robot (ver Alg. 1, líneas 6 a 9 para la predicción odométrica y 17 a 18 para actualización). La altura es generada en las líneas 10 y 11 considerando un mapa de alturas $h_M(x, y)$, construido durante la fase de mapeo al discretizar el plano XY y determinando la altura en cada celda. De forma adicional, integramos la odometría basada en el mapa para suavizar la estimación de alturas en caso de mapas con variaciones bruscas.

4.2. Inyección de partículas basada en apariencia

El re-muestreo de partículas y las oclusiones del láser pueden introducir errores en algunas ejecuciones [14], causando que el filtro de partículas di-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Algorithm 1 Base Localization Algorithm

1: $\langle x_t^{[i]}, y_t^{[i]}, \theta_t^{[i]}, \bar{z}_t^{[i]}, \sigma_{z,t}^{[i]}, \gamma, \varphi, \omega^{[i]} \rangle_i^L$ Current state of the filter /* *Prediction stage* */
2: **if** Odometric measurement $\mathbf{u}_t = \begin{bmatrix} v & \dot{\theta} & \gamma_{imu} & \varphi_{imu} \end{bmatrix}^T$ **then**
3: $\varphi \leftarrow \varphi_{imu}$
4: $\gamma \leftarrow \gamma_{imu}$
5: **for** $i = 1$ to L **do**
6: $\langle x_{t+1}^{[i]}, y_{t+1}^{[i]}, \theta_{t+1}^{[i]} \rangle \leftarrow$ sample_kinematic_model $(x_t^{[i]}, y_t^{[i]}, \theta_t^{[i]}, \mathbf{u}_t, \Delta t)$
7: $\mathbf{v}_g^{[i]} = \mathbf{R}(\gamma, \varphi, \theta^{[i]}) \begin{bmatrix} v & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$
8: $\hat{z}_{t+1}^{[i]} = \bar{z}_t^{[i]} + \Delta t \mathbf{v}_{g,z}^{[i]}$
9: $\hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} = \bar{\sigma}_{z,t}^{[i]2} + \sigma^2$
10: $\bar{z}_{t+1}^{[i]} = \bar{z}_t^{[i]} - \frac{\hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2}}{\hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} + \sigma_{z,M}^2}(z_t^{[i]} - h_M(x_t^{[i]}, y_t^{[i]}))$
11: $\bar{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} = \frac{\hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} \sigma_{z,M}^2}{\hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} + \sigma_{z,M}^2}$
12: $\omega_{t+1}^{[i]} = \omega_t^{(i)} \mathcal{N}(\hat{z}_{t+1}^{[i]}; h_M(x_t^{[i]}, y_t^{[i]}), \hat{\sigma}_{z,t+1}^{[i]2} + \sigma_{z,M}^2)$
13: **end for**
14: **end if**
15: **if** Laser measurement $\mathbf{z}_t$ **then**
16: **for** $i = 1$ to L **do**
17: Compute likelihood $p(\mathbf{z}_t | x_{t+1}^{[i]}, y_{t+1}^{[i]}, \theta_{t+1}^{[i]}, M)$
18: Update weight $\omega_{t+1}^{[i]} = p(\mathbf{z}_t | x_{t+1}^{[i]}, y_{t+1}^{[i]}, \theta_{t+1}^{[i]}, M) \omega_t^{(i)}$
19: **end for**
20: **end if**
21: Normalize weights $\{\omega_t^{(i)}\}, i = 1, \ldots, L$
22: Resample if necessary

verja o converja a una localización errónea. Estos efectos pueden ser limitados mediante técnicas inteligentes de re-muestreo [15], pero no pueden ser completamente evitados. Por esta razón proponemos extender el algoritmo MCL para incorporar información de sensores adicionales distintos de los láseres. En particular nuestra propuesta introduce información de apariencia proveniente de las imágenes mediante OpenFabMap2 [6], método probabilístico para navegación y mapeo basado en apariencia usando información espacial y de semejanza visual basado en Bag-of-Words para detectar cierres de bucles. Al no implementar tratamiento para la variación de iluminación, es necesario grabar datos a distintas horas del día para incrementar la precisión de los matches.

El Alg. 2 resume el método propuesto. Durante la etapa de mapeo (Sección 3) las imágenes izquierdas del par estéreo son grabadas a intervalos regulares de tiempo y espacio e incluidas en la base de datos de OpenFabMap2 junto con la posición en la que fueron tomadas. Esta base de datos es usada en una versión modificada de OpenFabMap2 que compara la imagen actual I_t con la base de datos (inalterada durante la ejecución). Si un emparejamiento entre las imágenes I_t y I_k de la base es detectado (Fig. 6), el algoritmo evaluará el error entre la posición actual del robot con la posición del robot en el momento en que se obtuvo la imagen I_k. Si el error en posición y orientación es superior a un umbral definido previamente se procederá a inyectar partículas en el conjunto de partículas de trabajo.

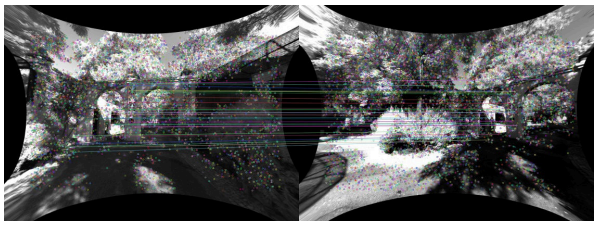


Figura 6: Matcheo entre imágenes.

Algorithm 2 Particle injection based on OpenFabMap2 place recognition

1: BoW database $\langle x_i, y_i, \theta_i, BoW_i \rangle$
2: **if** New image I_t **then**
3: Extract BoW_t from I_t
4: **if** match between present BoW_t and BoW_k from database **then**
5: Evaluate error in pose
6: **if** $error_p > th_p$ OR $error_o > th_o$ **then**
7: Substitute pf_th % particles with others distributed with center $\langle x_k, y_k, \theta_k \rangle$ and weight $\mathbf{w}_{injected}$
8: **end if**
9: **end if**
10: **end if**

El proceso de Inyección de Partículas consiste en reemplazar las *pf_th* partículas menos significativas, donde *pf_th* es un porcentaje del número actual de partículas en la hipótesis (en los tests realizados se procedió a reemplazar un 1 % de partículas), por nuevas partículas generadas con una distribución Gaussiana centrada en la posición donde la imagen I_k fue obtenida y con un nuevo peso $\mathbf{w}_{injected}$ relativo al máximo peso existente en el conjunto de partículas de trabajo (en los tests se tomó un valor del 50 %).

La Inyección de Partículas es hecha en el algoritmo base antes de evaluar las lecturas del láser (antes de la línea 14 en el Alg. 1), así las nuevas partículas verán sus pesos actualizados de acuerdo a la probabilidad obtenida con el ajuste del láser. Tras esto el algoritmo continua con el re-muestreo, favoreciendo a las partículas mejor localizadas con

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mayor peso, proveyendo así al módulo de localización de un permanente y rápido proceso de recuperación de errores en localización, con tiempos de recuperación del orden de 17s en el peor de los casos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Esta sección detalla un conjunto de experimentos ideados para validar el método propuesto. Los sensores del robot (láser, cámaras, odometría...) fueron almacenados durante una hora aproximadamente mientras navegaba 1,5 km. en el Zoo de Lisboa, un escenario desafiante, con rampas, vegetación e información no estructurada. Este conjunto de datos es distinto del usado para construir el mapa y para obtener las imágenes empleadas en OpenFabMap2 para reconocimiento de escenas. Los experimentos evaluarán la mejora en la precisión de localización cuando la etapa de reconocimiento de imágenes es integrada junto con MCL.

Para medir la precisión en localización de los algoritmos, la posición 2D real es calculada mediante los dos láseres horizontales cubriendo los 360 grados alrededor del robot y ejecutando un MCL con 5.000 partículas. El algoritmo propuesto (Inyección de Partículas) y el algoritmo base de localización (MCL) son comprobados contra la posición real usando el láser frontal y las cámaras de a bordo. Diferentes láseres de bajo coste y el efecto de escenarios concurridos son simulados mediante la reducción del rango máximo de los láseres. Los test prueban 6 veces ambos algoritmos para el único láser horizontal con 5m, 10m, 15m y 20m como rango máximo.

La Fig. 7 muestra el error medio absoluto en posición y orientación de seis intentos para cada configuración empleada de láser, tanto para la Inyección de Partículas como para MCL respecto a la trayectoria real. Puede verse como el algoritmo propuesto tiene menor error medio que MCL y, aún más, MCL tuvo que ser manualmente recuperado en varias ocasiones mientras que en el algoritmo con Inyección de Partículas nunca hubo que intervenir en la recuperación de localización. Se comprueba que el algoritmo de Inyección de Partículas proporciona una rápida y robusta recuperación incluso en las peores situaciones con oclusiones de láseres y gente rodeando al sensor. Se reduce drásticamente hasta cero el número medio de veces que el robot se pierde. Se verifica para distintas longitudes máximas de lectura de láser (ver Tabla 1). Como se esperaba, con menores longitudes máximas de medida de láser, mayores son las probabilidades de que el robot acabe perdido.

Tabla 1: Recuperaciones medias (veces por configuración de rango máximo) para MCL y MCL con Inyección de Partículas

Rango Máximo	MCL	MCL+PI
5m	2,5	0
10m	0,83	0
15m	0,66	0
20m	0	0

Tabla 2: Valores medios y desviación estándar para error en posición y orientación para MCL con distintos valores de rango máximo de láser

Rango Máximo	MCL	
	err. pos. (m)	err. or. (rad)
5m	$10{,}73 \pm 13{,}64$	$0{,}20 \pm 0{,}33$
10m	$10{,}39 \pm 19{,}74$	$0{,}20 \pm 0{,}35$
15m	$2{,}27 \pm 6{,}87$	$0{,}08 \pm 0{,}19$
20m	$2{,}83 \pm 6{,}18$	$0{,}12 \pm 0{,}24$

Las Tablas 2 y 3 presentan errores medios en localización para cada uno de los intentos realizados para cada configuración de láser comparados contra la trayectoria real para MCL (Tabla 2) y para la Inyección de Partículas (Tabla 3). Se verifica que los errores se mantienen cerca a 1 m. en posición y 0.01 rad. en orientación para todas las configuraciones de láser en nuestro algoritmo propuesto, mientras que los errores son elevados para MCL con láseres limitados a 5 y 10 metros.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo hemos presentado un algoritmo para integrar reconocimiento visual de escenas con Localización Monte Carlo y disponer de un sistema más robusto en escenarios concurridos e irregulares. Este método permite inyectar partículas en los posibles lugares donde se esté produciendo cierres de bucles, chequeando la posición de la nueva hipótesis con las medidas de los láseres.

Tabla 3: Valores medios y desviación estándar para error en posición y orientación para MCL+Inyección de Partículas con distintas configuraciones de rango máximo de láser

Rango Máximo	MCL + Particle Injection	
	err. pos. (m)	err. or. (rad)
5m	$1{,}95 \pm 6{,}59$	$0{,}08 \pm 0{,}19$
10m	$1{,}27 \pm 5{,}14$	$0{,}05 \pm 0{,}14$
15m	$1{,}04 \pm 4{,}85$	$0{,}04 \pm 0{,}13$
20m	$1{,}10 \pm 6{,}55$	$0{,}037 \pm 0{,}10$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

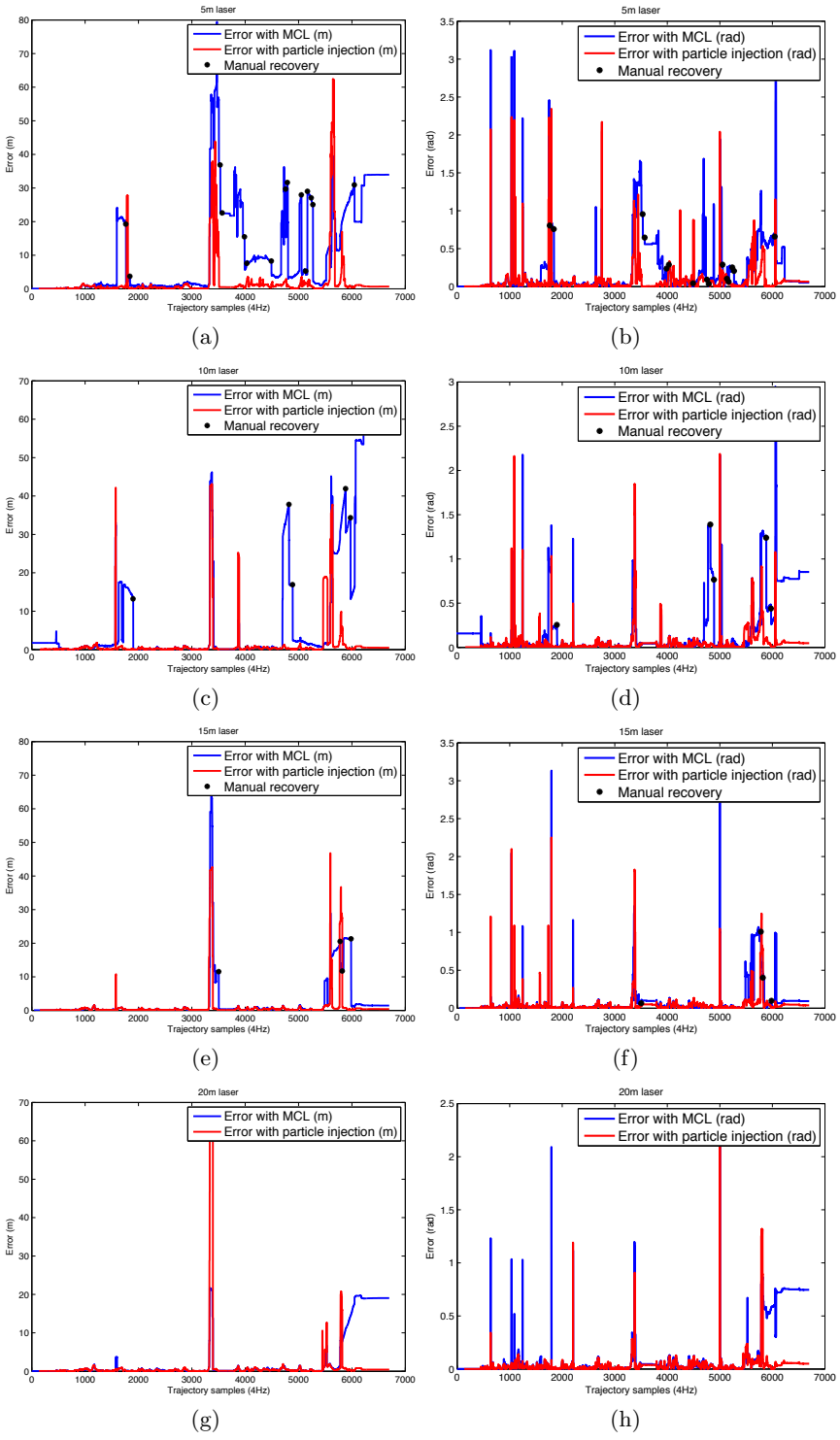


Figura 7: Comparación de error medio en posición (izda.) y error absoluto medio en orientación (derecha) entre MCL (azul) y Algoritmo de Inyección de Partículas propuesto (rojo) tras 6 simulaciones para cada configuración de láser. MCL fue supervisado y manualmente recuperado en caso de pérdida. Todas las recuperaciones manuales están representadas en las gráficas mediante puntos azules (un punto determina que se produjo una pérdida en localización en al menos 1 de las 6 simulaciones para la configuración en cuestión). Las recuperaciones manuales se representan así mismo en la Tabla 1 para cada configuración de láser.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Los resultados experimentales con datasets muestran que el método se comporta correctamente y reduce drásticamente el número medio de veces que el robot se pierde, con el correspondiente impacto en la precisión y fiabilidad de la localización.

El trabajo futuro incluirá análisis de las áreas de navegación y la inclusión de diversos modelos de distribución de probabilidad de las partículas en las distintas zonas del mapa. En este artículo hemos empleado una distribución Gaussiana, pero en pasillos sería más eficiente usar modelos que distribuyesen las partículas a lo largo de ellos, haciendo la dispersión más alargada en la dirección longitudinal del pasillo. Análisis similares pueden realizarse para otras áreas teniendo en cuenta cómo se distribuye la gente en escenarios concurridos, patios, salas alargadas o recorridos turísticos.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por el 7º Programa Marco de la Comisión Europea: proyecto 288235 (FROG) y el proyecto PAIS-MultiRobot, financiado por la Junta de Andalucía (TIC-7390).

Referencias

[1] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, and C. Hahnel, October 2000, "Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 19, pp. 972–999.

[2] R. Kümmerle, M. Ruhnke, B. Steder, C. Stachniss, and W. Burgard, 2013, "A navigation system for robots operating in crowded urban environments," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, pp. 3225–3232.

[3] P. F. Alcantarilla, O. Stasse, S. Druon, L. M. Bergasa, and F. Dellaert, Jan. 2013, "How to localize humanoids with a single camera?" *Auton. Robots*, vol. 34, no. 1-2, pp. 47–71.

[4] M. Hentschel and B. Wagner, 2011, "An adaptive memory model for long-term navigation of autonomous mobile robots," in *Journal of Robotics*, 2011.

[5] F. Dayoub and T. Duckett, Sept 2008, "An adaptive appearance-based map for long-term topological localization of mobile robots," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, Sept 2008, pp. 3364–3369.

[6] A. J. Glover, W. P. Maddern, M. Warren, S. Reid, M. Milford, and G. Wyeth, 2012, "Openfabmap: An open source toolbox for appearance-based loop closure detection." in *ICRA*. IEEE, 2012, pp. 4730–4735.

[7] D. Galvez-Lopez and J. D. Tardos, October 2012, "Bags of binary words for fast place recognition in image sequences," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 5, pp. 1188–1197.

[8] A. Angeli, D. Filliat, S. Doncieux, and J. arcady Meyer, 2008, "A fast and incremental method for loop-closure detection using bags of visual words," *IEEE Transactions On Robotics, Special Issue on Visual SLAM*, pp. 1027–1037.

[9] H. M. Wallach, 2006, "Topic modeling: Beyond bag-of-words," in *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*, ser. ICML '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 977–984.

[10] P. Corke, R. Paul, W. Churchill, and P. Newman, 2013, "Dealing with shadows: Capturing intrinsic scene appearance for image-based outdoor localisation." in *IROS*. IEEE, 2013, pp. 2085–2092.

[11] R. Kummerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, and W. Burgard, 2011, "g2o: A general framework for graph optimization," in *Proc. International Conference on Robotics and Automation, ICRA*. IEEE, 2011, pp. 3607–3613.

[12] S. Thrun, D. Fox, W. Burgard, and F. Dellaert, 2000, "Robust monte carlo localization for mobile robots," *Artificial Intelligence*, vol. 128, no. 1-2, pp. 99–141.

[13] A. Doucet, N. d. Freitas, K. P. Murphy, and S. J. Russell, June, 2000, "Rao-blackwellised particle filtering for dynamic bayesian networks," in *Proceedings of the 16th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, ser. UAI '00. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., June, 2000, pp. 176–183.

[14] L. Carlone and B. Bona, June 2009, "A comparative study on robust localization: Fault tolerance and robustness test on probabilistic filters for range-based positioning," in *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on*, June 2009, pp. 1–8.

[15] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DISTRIBUIDO EN ROBOTS MÓVILES SOBRE EL MIDDLEWARE DEL NÚCLEO DE CONTROL

Josep Tormo, Raúl Simarro, Eduardo Munera, José E. Simó, Juan-Luis Posadas-Yagüe
Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2)
Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.
jotorcos@etsii.upv.es, {rausifer, emunera, jsimo, jposadas}@ai2.upv.es

Resumen

En este trabajo se presenta la simulación de un robot móvil con control distribuido, cuyo objetivo es la validación de un middleware de control. Se definen las características y servicios que proporciona el middleware, así como las funciones más importantes de comunicación, modos de funcionamiento, calidad de control, etc. Se detallan las pruebas realizadas mediante un simulador de sistemas robóticos en el que se han implementado las funciones de middleware. Por último, se introduce el proceso de construcción del robot real, que será el siguiente paso en el proceso de validación del middleware.

Palabras Clave: control distribuido, middleware de control, simulación

1 INTRODUCCIÓN

Cuando se realiza la programación de cualquier tipo de aplicación software, una parte importante dentro de su desarrollo es la fase de testeo y pruebas para comprobar su correcto funcionamiento. En el caso de un middleware de control, en el que en su desarrollo intervienen varias personas, cada una especialista en un campo (comunicaciones, control, componentes hardware, etc.), y en el que en la implementación actúan diversos componentes físicos, así como diversas configuraciones disponibles, ésta fase de validación y testeo es muy importante y crítica. Por lo tanto, la posibilidad de disponer de demostradores, diversas configuraciones hardware, sensores, etc., es fundamental para probar y verificar el correcto funcionamiento.

Los simuladores permiten, en una primera fase, testear diversas configuraciones hardware, comunicaciones, condiciones de funcionamiento, etc., de una manera sencilla, provocando las situaciones más desfavorables para poder validar el correcto funcionamiento de la implementación realizada y la detección de posibles errores. Una vez superada esta primera fase de pruebas mediante simulación, el sistema está preparado para ser implementado sobre un sistema real [8].

A continuación se presenta el trabajo para realizar las pruebas de un middleware de control. Este middleware, denominado núcleo de control, permite la comunicación entre dispositivos, el tratamiento de la información de sensores inteligentes, distintos modos de funcionamiento, cálculo de la calidad del control, etc.

Las pruebas realizadas se centran en demostradores aplicados a la robótica móvil. La razón de utilizar este tipo de demostración es que el sistema de sensorización está distribuido, se dispone de varios nodos de cómputo y para la consecución del objetivo a conseguir se deben coordinar diversas tareas.

2 ESTRUCTURA DE CONTROL

La heterogeneidad de los sistemas actuales, formados por múltiples componentes de características diferentes conectados en red, sugiere el desarrollo de sistemas de control distribuido en los que las distintas funciones de control se implementen a diferentes niveles. Cuando en esta configuración se incluyen elementos dotados de movilidad (robots, vehículos,…), la capacidad de obtener y procesar información, así como la de generar acciones de control, es variable con el tiempo. Es más, los recursos disponibles en cada momento por cada elemento para realizar las actividades que se le asignen, también variables, son limitados. Por ello, es preciso definir una estructura de control jerarquizado de forma que se asegure que las acciones de máxima prioridad se ejecuten a nivel local y que el resto (opcionales, refinamientos, de coordinación) se lleven a cabo en niveles superiores, con menor prioridad.

2.1 MIDDLEWARE DE CONTROL

El núcleo de control, asimilable al núcleo de un sistema operativo, se define como el código mínimo que debe ejecutarse en una aplicación de control para que el funcionamiento sea seguro, y es el encargado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la conexión entre los nodos del sistema distribuido [1].

Un sistema de control distribuido debe garantizar siempre la seguridad en el proceso que está regulando. La estrategia de control debe hacer frente a problemas como pérdida de datos, retardos o tiempo excesivo de cálculo, consiguiendo una degradación admisible de prestaciones. Los controladores desarrollados deben permitir la adaptación de los mismos a las condiciones de trabajo, utilizando los recursos adecuados en cada momento, para no tener pérdidas significativas de prestaciones en el logro de los objetivos a conseguir.

El núcleo de control se materializa en la forma de un middleware sobre el que se ejecuta la aplicación de control, que está compuesta por diferentes actividades computacionales. El middleware permite una adecuada separación entre el sistema operativo (SO), si lo hubiese, y la aplicación de control, brindando un diseño rápido de aplicaciones y un desarrollo transparente. El middleware gestiona la ejecución de las actividades, y ofrece componentes básicos necesarios para el diseño de aplicaciones de control (reguladores, conmutadores, muestreadores, actuadores, retenedores,…), además, incorpora servicios de evaluación de la "calidad del control" que permiten la detección de situaciones de excepción y la definición de acciones asociadas a estas situaciones.

El middleware ofrece un conjunto de servicios que hacen posible el funcionamiento de aplicaciones distribuidas sobre plataformas heterogéneas. Funciona como una capa de abstracción de software distribuida, que se sitúa entre las capas de aplicaciones y las capas inferiores (sistema operativo y red). El middleware nos abstrae de la complejidad y heterogeneidad de las redes de comunicaciones subyacentes, así como de los sistemas operativos y lenguajes de programación, proporcionando una API para la fácil programación y manejo de aplicaciones distribuidas. Dependiendo del problema a resolver y de las funciones necesarias, serán útiles diferentes tipos de servicios middleware.

2.1.1 Middleware reducido (Tiny Middleware)

El middleware de control en su versión más reducida, también conocida como Tiny Middleware, ha sido desarrollado para ofrecer una solución ligera y eficiente que pueda ser implementada en sistemas con recursos limitados. En un entorno de control, este tipo de sistemas serían encargados de realizar tareas sencillas de percepción y actuación al más bajo nivel. Para ello, intercambiará información con otros dispositivos del sistema, que usualmente implementan una versión completa del middleware. Al mismo tiempo, ofrecerá capacidades de monitorización del sistema y gestión de alarmas, a fin de detectar posibles fallos e informar de los mismos. Por lo tantos los principales servicios ofrecidos por el Tiny Middleware serán:

- Servicios de percepción y actuación: Deberán interactuar con los sensores y actuadores físicamente conectados al nodo, con el fin de garantizar un flujo constante de información preprocesada en el caso del sensor, e interpretando correctamente las acciones de control en el del actuador. En ambos casos será crítico poder asegurar el periodo de muestreo o actuación.
- Delegación de código: Son mecanismos para otorgar una mayor flexibilidad al sistema. Los nodos con una mayor carga computacional podrán delegar ciertas funciones a otros nodos más ociosos, asegurando un mejor aprovechamiento de los recursos.
- Monitorización del sistema y alarmas: Este servicio se encargará de monitorizar los recursos del sistema así como el correcto funcionamiento de los controladores. Al mismo tiempo, un sistema de alarmas avisará de posibles errores del sistema que gestionará estas excepciones a fin de proporcionar un sistema tolerante a fallos.
- Sistema de comunicaciones: Manejará las diferentes interfaces de comunicación ofreciendo un interfaz común a todas ellas. Dependiendo de los recursos de cada nodo se implementarán diversos tipos de protocolos, tales como RS-232 o RS-485 para los más limitados y TCP/IP para aquellos con mayores prestaciones.
- Gestión de datos: Ofrece una transparencia en el intercambio de información, permitiendo acceso tanto a datos locales como a variables compartidas en la red mediante un sistema "Data Centric Publisher Subscriber" (DCPS) [6].

2.1.2 Middleware completo (Full Middleware)

El middleware completo, o Full Middleware, ha sido diseñado para ser implementado en sistemas con unas limitaciones menos restrictivas que en el caso anterior, y por lo tanto la cantidad de servicios que pueden ofrecer ha sido ampliada. El Full Middleware ofrece un interfaz más completo, y será usualmente el encargado de la ejecución de los algoritmos de control más complejos, así como de aglutinar la información de rendimiento, mediante medidas de calidad de servicio (QoS) [7], y alarmas producidas por los nodos con el middleware reducido. Al mismo tiempo ofrecerá un interfaz de alto nivel para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

gestionar las configuraciones del sistema. Por lo tanto, los servicios exclusivos del Full Middleware son descritos a continuación:

- Gestión de Calidad de servicio: Este servicio está orientado a la supervisión de ciertas medidas de calidad en la ejecución del sistema, de forma que pueda efectuar una gestión más eficiente de las tareas y servicios.
- Gestión de recursos: Ofrece una interfaz para la correcta gestión de los recursos del sistema, tanto del propio nodo como de otros servicios de delegación de código entre nodos. Realizará las modificaciones pertinentes del sistema de control para adaptarse al funcionamiento
- Interfaz de configuración y monitorización: Ofrece un entorno "Human Machine Interface" (HMI) para la gestión de las configuraciones del sistema de forma gráfica. Al mismo tiempo este entorno servirá para la monitorización del sistema.

2.2 SISTEMA DISTRIBUIDO DE CONTROL

La figura 1 muestra la estructura propuesta del sistema distribuido de control, formada por nodos supervisores, que implementan un middleware completo, y nodos locales, con un middleware reducido [9].

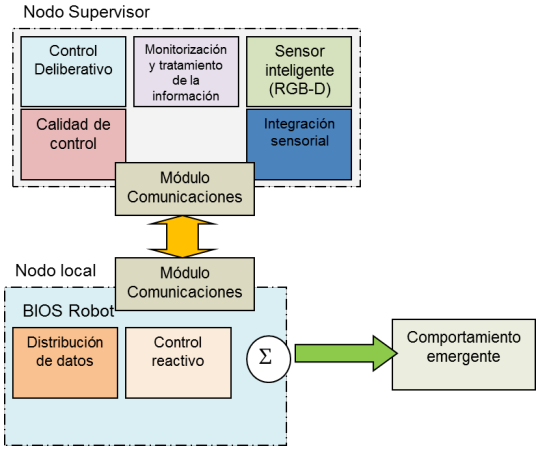


Figura 1: Estructura del sistema distribuido de control en el robot móvil

El supervisor se encarga de ejecutar las tareas de control de alto nivel que necesitan una gran capacidad de cómputo, o bien, las que necesitan la integración de varios sensores inteligentes que proporcionan una información adicional sobre el escenario, como por ejemplo el sensor Kinect, que es una cámara de tipo RGB-D (*Red, Green, Blue, Depth*). El supervisor es el que ejecuta la parte deliberativa del comportamiento del robot, como puede ser un seguimiento de la trayectoria, la realización de mapas del entorno, la integración de la información sensorial para la mejora de la navegación, etc.

El local es el que se encuentra integrado en el propio robot, y es el que permite realizar las tareas más inmediatas sobre el proceso. El objetivo fundamental de los nodos locales es asegurar que siempre exista una acción de control para mandar al proceso. En el caso de un sistema robótico es el que integra la parte reactiva de evitación de obstáculos o el alcanzar las zonas seguras del entorno.

3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO

Para poder validar la estrategia de control propuesta, se propone la utilización de un simulador que permita implementar la estructura de control distribuida, la utilización del middleware de control y que tenga un interfaz de programación fácil. La plataforma de simulación elegida es V-REP [3].

V-REP es un potente simulador 3D de robots de software libre (en su versión académica) basado en una arquitectura modular y descentralizada. Ofrece la posibilidad de comunicar el simulador con C/C++, Java, Python, Matlab, Octave y Urbi mediante el uso de APIs de clientes remotos. De esta manera se puede controlar un mismo robot desde un script de Lua empotrado en el mismo simulador o desde fuera del simulador [4].

Para implementar el nodo supervisor se utilizará Matlab, ya que permite la realización rápida y fácil de algoritmos de control, además de estar disponibles las funciones del middleware. V-REP dispone de la comunicación con Matlab mediante una API remota.

3.1 SIMULACIÓN LOCAL

Cuando no se necesitan utilizar funciones que requieran un gran procesamiento de la información, ni tareas de alto nivel, se puede implementar el comportamiento del robot sobre el nodo local directamente. Para realizar esta implementación se pueden utilizar dos alternativas: mediante un Child Script o con un Plugin en C.

3.1.1 Child Script

Se aplica utilizando scripts asociados a los objetos del escenario, es decir, un Child Script estará asociado al robot y el código se escribirá en éste, en lenguaje Lua [5]. En la figura 2 se muestra una prueba, utilizando las funcionalidades

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

proporcionadas por el middleware mediante el Child Script, en que el robot implementa dos comportamientos: seguimiento de una trayectoria definida y evitación de obstáculos.

3.1.2 Plugin en C

Se implementa haciendo uso de la funcionalidad de plugins en C proporcionada por el simulador. En este caso, el simulador cargará automáticamente al inicio la librería compartida, con esto, en el child script asociado al robot se pone una función que pasará el control del robot a manos del código escrito en C. De este modo, se puede probar el funcionamiento del middleware cada vez que se desee con solo compilar el código C y generar una librería compartida.

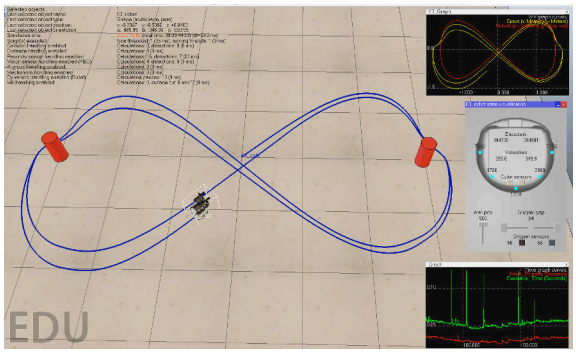


Figura 2: Prueba del seguimiento de trayectoria y evitación de obstáculos

3.2 SIMULACIÓN DISTRIBUIDA

Para simular la estructura de control de nodos mencionada, se ubica el código de control del nodo supervisor en Matlab, mientras que el código de control del nodo local se aloja en el script del propio robot en V-REP. En la figura 3 se muestran los dos modos de comunicación utilizados.

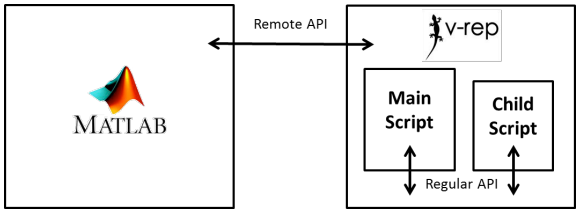


Figura 3: Esquema del sistema distribuido implementado en simulación

Por una parte, para comunicar el propio robot (Child Script) con el entorno de simulación (Main Script) se hace uso de la API regular, que está compuesta por varios cientos de funciones que se pueden llamar desde cualquier script de Lua empotrado.
Por otra parte, para comunicar V-REP con Matlab se utiliza la API remota, formada por un conjunto de funciones que se pueden llamar desde Matlab y permiten la comunicación con V-REP vía socket. Se pueden establecer comunicaciones tanto asíncronas como síncronas. En el lado de Matlab se llama a las funciones necesarias para la comunicación y se asegura la conexión. En el lado del simulador se introduce el puerto seleccionado y la estructura necesaria para una comunicación síncrona.

3.2.1 Pruebas realizadas

Para testear la estructura de control distribuida, se ha realizado la siguiente prueba: Se parte de un robot con tracción diferencial y un brazo manipulador Khepera III al que se le añade una cámara RGB-D (Kinect), tal y como se muestra en la figura 4. Se crea un entorno con obstáculos al que se añaden varios cilindros rojos. La misión del robot será encontrar y recoger un cilindro rojo para dejarlo en algún punto del escenario previamente indicado, evitando los obstáculos que se le presenten.

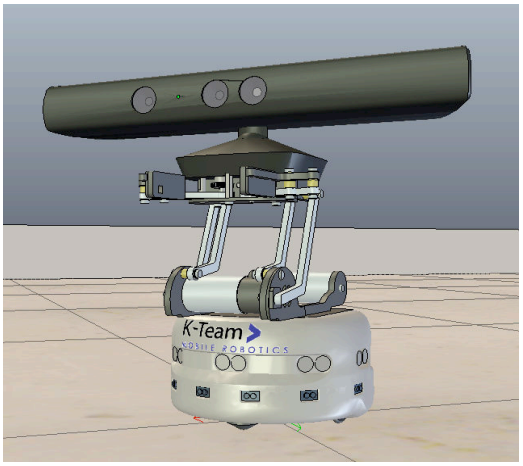


Figura 4: Robot con el brazo manipulador y sensor RGB-D

Siguiendo el esquema de comunicación distribuida, en el script del robot se implementan los comportamientos más básicos, que permitirán que ante cualquier fallo de comunicación con el supervisor se pueda continuar proporcionando una acción de control. Estos comportamientos son: la cinemática inversa y la evitación de obstáculos, basada en un vehículo de Braitenberg [2]. De esta forma, en Matlab es donde se implementan los comportamientos de más alto nivel y por tanto con mayores requerimientos de computación. Estos comportamientos son: el procesamiento de la imagen enviada por la Kinect, el cálculo de la trayectoria para llegar al punto objetivo y el mapeo del escenario combinando los sensores infrarrojos y la Kinect, además de la adquisición del punto de llegada pedido y la conmutación de misiones.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

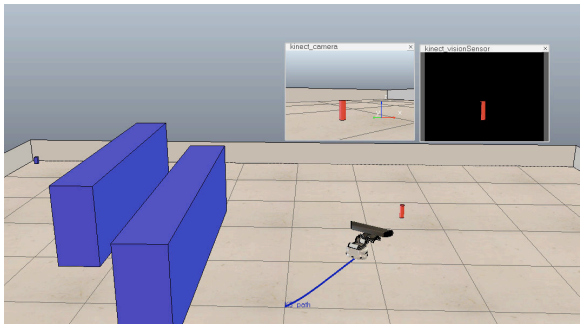


Figura 5: Prueba de reconocimiento y manipulación de objetos

3.3 UTILIZACIÓN DEL MIDDLEWARE DE CONTROL CON V-REP

Con el propósito de disponer de un interfaz común, tanto para robots físicos, como para robots simulados mediante el uso de V-REP, se ha adaptado el uso del Middleware de control en ambas arquitecturas. Gracias a ello, la migración de código entre dichas plataformas será instantánea. De esta forma, el simulador podrá ser utilizado para la realización de pruebas repetitivas de forma acelerada, relegando el uso de la plataforma física para la validación final, ahorrando así tiempo en el desarrollo de experimentos y evitando el deterioro del robot real como resultado de pruebas erróneas.

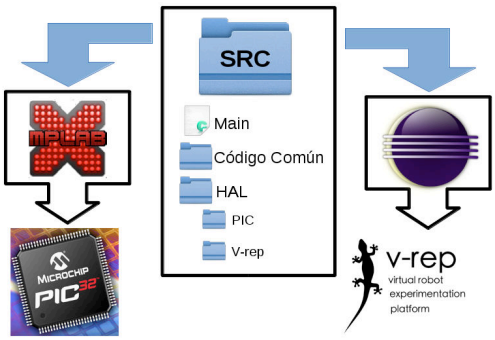


Figura 6: Migración de código entre plataformas.

Además de esto, el poder ejecutar el Middleware en ambas plataformas implica también heredar su jerarquía de nodos así como sus capacidades de comunicación. Teniendo esto en cuenta, surge la posibilidad de combinar nodos reales con nodos simulados que interactuarán de forma totalmente transparente.

Una de las pruebas realizadas es la implementación del nodo supervisor sobre un PIC32, que se comunica con el simulador. En el simulador se ejecuta el nodo local sobre el robot simulado, que enviará la información de los sensores del robot hacia el nodo supervisor, y recibirá las acciones de control calculadas en el PIC32.

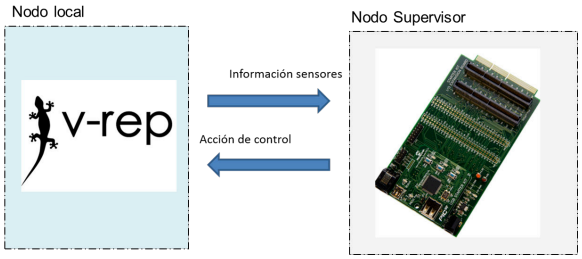


Figura 7: Implementación del nodo supervisor sobre un PIC32

4 CALIDAD DE CONTROL

Una de las tareas del nodo supervisor es la de monitorizar los datos del sistema. Estos servicios permiten comprobar el cumplimiento de las especificaciones de control, así como valorar su correcto funcionamiento. Estos parámetros son una medida de la calidad de control (QoC) obtenida con la estrategia implementada. En caso de que la calidad no sea la esperada se pueden realizar acciones correctoras.

Uno de los parámetros para estimar la QoC son los incrementos en la acción de control, así como el mantenimiento de la acción de control en valores cerca del límite de actuación. En caso de que se detecten acciones fuera de rango se podría cambiar la estrategia de control relajando las especificaciones.

Desde luego un parámetro fundamental para estimar la QoC es el error, es decir, la diferencia entre la referencia y las variables controladas. En caso de que ese error supere un cierto valor definido, el supervisor podría enviar una acción de control correctora o cambiar el tipo de control.

4.1 PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se muestran las pruebas realizas en un robot móvil en el seguimiento de una trayectoria (figuras 8 y 9). El control local realiza la estimación de la posición en función de la odometría. El supervisor dispone de un sistema de localización global del robot, pero que sólo puede ser enviado en ciertos instantes. En caso de que el supervisor detecte un error muy grande envía la posición global para que el robot recalcule su posición con datos más precisos.

La figura 8 muestra el error entre la posición del robot y la trayectoria a seguir. El nodo supervisor cuando envía la posición global permite reducir el error del robot y así mejorar el seguimiento en la trayectoria (figura 9).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

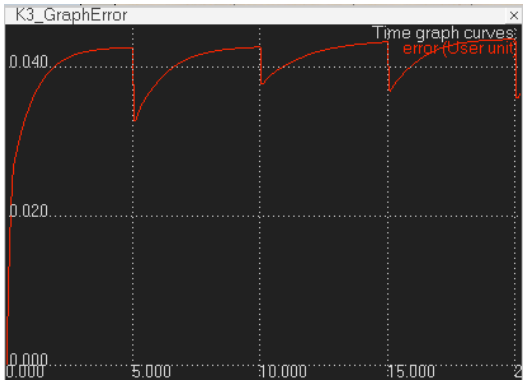


Figura 8: Error cometido en función del tiempo

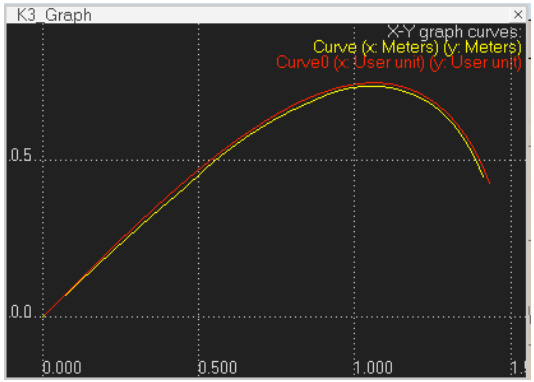


Figura 9: Seguimiento de la trayectoria con la corrección del error cometido

5 SISTEMA ROBÓTICO REAL

El robot real, que va a servir de demostrador de las funcionalidades del middleware de control, ha sido diseñado dentro del proyecto de investigación CICYT denominado COBAMI con referencia DPI 2011-28507-C02-01/02. Se trata de un robot diferencial con sensores de infrarrojos y ultrasonidos, cuya principal novedad es la de montar el sensor inteligente de visión RGB-D, basado en Kinect, y toda la electrónica asociada.

Las piezas de este robot se han diseñado mediante un programa de diseño asistido por computador, para posteriormente generarlas mediante una impresora 3D. Este mismo diseño se ha aprovechado para importar el modelo al simulador, con lo que se puede ver tanto su aspecto físico como su comportamiento con la estrategia de control implementada. Además, de esta forma, se puede seleccionar la mejor ubicación para los sensores (anillo de infrarrojos, encoders, Kinect,..) y los actuadores (motores). En la figura 10 se muestra el robot real y su simulación mediante V-REP.

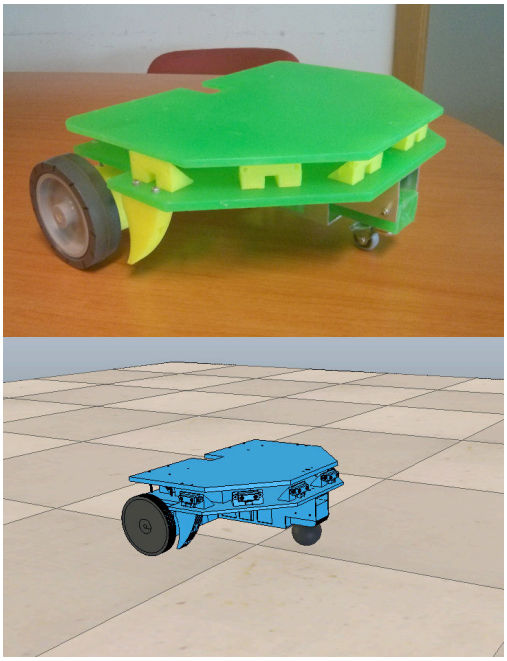


Figura 10: Robot real y simulado

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una estructura de control distribuida aplicada a sistemas robóticos móviles. La estructura de control está formada por nodos supervisores y locales, que hacen uso de un middleware de control realizado en el entorno del proyecto en el que se inscribe el presente trabajo.

Para probar la estrategia de control se ha utilizado un entorno de simulación, en el que se han implementado los distintos nodos de control haciendo uso de la API proporcionada por el middleware de control.

En el simulador se ha realizado varias pruebas que permiten desde validar el middleware como las distintas estrategias de control propuestas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT COBAMI con referencia DPI 2011-28507-C02-01/02, del Ministerio de Educación y Ciencia.

Referencias

[1] Albertos, P., Crespo, A., y Simó, J.E. (2006) Control Kernel: A key concept in embedded control systems. 4th IFAC Symposium on Mecatronic Systems.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[2] Braitenberg, V. (1984) Vehicles: Experiments in synthetic psychology. Cambridge, MA. MIT Press.

[3] Coppelia Robotics (2014) V-REP: Virtual Robot Experimentation Platform. http://www.coppeliarobotics.com/

[4] Freese, M., Singh, S., Ozaki, F., & Matsuhira, N. (2010). Virtual robot experimentation platform V-REP: a versatile 3D robot simulator. In *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots* (pp. 51-62). Springer Berlin Heidelberg.

[5] Lua The Programming Language (2014) Lua 5.2 Reference Manual. http://www.lua.org/manual/5.2/

[6] Pardo-Castellote, G. (2003, May). Omg data-distribution service: Architectural overview. In Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on (pp. 200-206). IEEE..

[7] Poza, J. L., Posadas, J. L., & Simó, J. E. (2009, January). QoS-based middleware architecture for distributed control systems. In International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence 2008 (DCAI 2008) (pp. 587-595). Springer Berlin Heidelberg.

[8] Pressman, R. S. (2005) "Ingeniería de Software. Un enfoque práctico". Editorial McGraw-Hill

[9] Simarro, R., Coronel, J., Simó, J., & Blanes, J. F. (2008, July). Hierarchical and distributed embedded control kernel. In *17th IFAC World Congress*.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ENFOQUE UNIFICADO DEL DISEÑO DE PID MEDIANTE EL LUGAR DE LAS RAÍCES Y EN FRECUENCIA

Roberto Sanchis Llopis
Ignacio Peñarrocha Alós
Julio Ariel Romero Pérez
D. ESID. Universitat Jaume I, rsanchis@uji.es

Resumen

En este trabajo se describe una forma de enfocar los métodos de diseño de controladores PID que unifica la estrategia de diseño tanto si se usa la técnica de lugar de las raíces como la de respuesta en frecuencia. La clave del enfoque es plantear el problema de ajuste de un PID como un compromiso entre tres factores: la rapidez de respuesta, la robustez, y la amplificación del ruido. La combinación de esos tres factores permite abordar el problema de diseño del PID desde tres enfoques, que resultan de fijar unos límites en dos de esos factores, y optimizar el tercero. Estos tres enfoques pueden aplicarse de forma muy similar tanto mediante la técnica del lugar de las raíces como mediante la técnica de la respuesta en frecuencia, lo que da al estudiante una visión más clara de cómo intervienen los tres factores citados en al problema de diseño de un controlador PID.

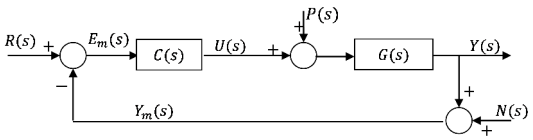
Palabras Clave: PID, diseño en frecuencia, lugar de las raíces.

1 INTRODUCCIÓN

El ajuste de PID ha sido abordado tradicionalmente en las asignaturas de grado utilizando un enfoque diferente para la técnica del lugar de las raíces y para la técnica de la respuesta en frecuencia (ver por ejemplo [3], [4] o [5]). Además, el tema del efecto del ruido de medida se tenía en cuenta de una forma indirecta posterior al diseño. El método basado en el lugar de las raíces partía generalmente de unas especificaciones de tiempo de establecimiento y sobreoscilación, que se traducían en una ubicación de los polos dominantes deseados en bucle cerrado. En cambio en los métodos basados en la respuesta en frecuencia se solía partir de unas especificaciones en forma de margen de fase y ancho de banda de bucle cerrado. El efecto del ruido de medida solo era tenido en cuenta a posteriori (o ni siquiera eso), y la idea de optimizar el comportamiento también era algo que no se abordaba o solo se abordaba de forma somera. Una de las dificultades importantes que justificaban esta forma de proceder era que los exámenes se hacían con papel, por lo que procedimientos de optimización eran difíciles de llevar a cabo con calculadoras simples. Aplicar el criterio del argumento para resolver un diseño mediante el lugar de las raíces ya era un problema bastante complicado. La introducción masiva del uso del ordenador tanto en la impartición como en la evaluación de las asignaturas de control ha permitido cambiar ese enfoque tradicional, para centrarse en analizar conceptualmente cuáles son los factores que intervienen en el ajuste de un controlador y plantear estrategias de ajuste de PID basadas en el compromiso entre esos factores y en utilizar de forma natural la idea de buscar soluciones óptimas en algún sentido. El problema del cálculo numérico queda en un segundo plano, ya que se resuelve de forma rápida utilizando el ordenador. En este trabajo se resume el enfoque que hemos adoptado para la enseñanza de métodos de diseño de PID en una asignatura de grado común a varias titulaciones de la rama industrial, tratando de unificar el enfoque cuando se utiliza la técnica del lugar de las raíces y la técnica de la respuesta en frecuencia.

2 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA DE CONTROL REALIMENTADO

La estructura básica de un sistema de control realimentado lineal es la mostrada en la figura



Donde r(t) es la referencia (valor que se quiere que tome la salida y(t)), p(t) es una perturbación genérica que afecta al proceso y que se modela como una perturbación a la entrada. La señal n(t) es un ruido de medida aleatorio (normalmente de frecuencia alta) que afecta a la medición de la salida y_m(t) realizada por el sensor. El modelo lineal del proceso (función de transferencia $G(s)$), incluye el sensor y el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

actuador. El controlador es un sistema lineal definido por su función de transferencia $C(s)$.

2.1 Requerimientos del sistema de control

El objetivo básico del control realimentado es definir las acciones de control que permitan llevar la salida del sistema hacia la referencia asegurando ciertas prestaciones frente a la presencia de perturbaciones y ruido de medida y frente a la posibilidad de cambios en el proceso.
Hay tres factores importantes a tener en cuenta para diseñar un sistema de control.
Velocidad de respuesta. Indica lo rápido que responde el controlador para conseguir los objetivos de control, que pueden dividirse en dos tipos:

- Seguimiento de referencia. Será tanto mejor cuanto más rápido sea el sistema controlado.
- Rechazo de perturbaciones. Si se produce un cambio en la perturbación, la desviación de la salida será tanto menor y se corregirá antes cuanto más rápido sea el sistema controlado.

Atenuación de ruidos de alta frecuencia. El ruido de alta frecuencia produce en el controlador una acción que varía de forma rápida, que conviene evitar, ya que puede dañar los actuadores y provocar variaciones indeseadas en la salida.
Robustez. Una propiedad básica que debe cumplir el sistema controlado es la estabilidad. En un sistema real, el comportamiento del proceso cambia con el tiempo, pero no el del controlador. Se dice que el controlador es robusto si mantiene un comportamiento estable y adecuado del sistema controlado cuando el proceso cambia.

En el diseño de un sistema de control realimentado existe un compromiso entre la velocidad de respuesta, la atenuación del ruido de alta frecuencia y la robustez frente a cambios del proceso. Los objetivos entran en conflicto: se requieren ganancias elevadas y respuesta rápida para rechazar las perturbaciones y seguir referencias, y ganancias bajas y respuesta lenta para reducir los efectos del ruido o garantizar una robustez elevada.

2.2 Controlador PID

El controlador (o regulador) PID se supone definido por la ecuación diferencial:

$$U(s) = \underbrace{K_p\left(b + \frac{1}{T_i s} + c\frac{T_d s}{1+\frac{T_d}{N}s}\right)}_{C_{ff}(s)} R(s) - \underbrace{K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1+\frac{T_d}{N}s}\right)}_{C(s)} Y_m(s)$$

Tiene como parámetros característicos la ganancia proporcional K_p, el tiempo integral T_i, el tiempo derivativo T_d, el parámetro del filtro N, y los factores de ponderación de la parte proporcional y derivada de la referencia, b y c. El diseño del controlador PID consiste en definir el valor de esos parámetros para lograr cumplir los objetivos de control requeridos.

3 ESPECIFICACIONES DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA CONTROLADO.

Antes de plantear métodos de diseño de PID es necesario en primer lugar expresar los objetivos de control descritos antes en términos de especificaciones que puedan cuantificarse en función de los parámetros del controlador.

3.1 COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN PERMANENTE. ERROR.

El error en régimen permanente depende fundamentalmente de la presencia de integrador en el controlador. Si se utiliza un controlador PI ó PID, el error ante referencia y perturbación escalón es nulo. En lo sucesivo se supondrá que el controlador utilizado tiene integrador.

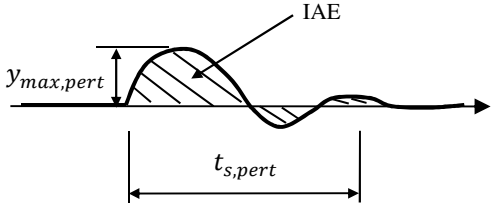
3.2 ESPECIFICACIONES RELACIONADAS CON LA RAPIDEZ DE RESPUESTA.

Éstas incluyen las relacionadas con el rechazo de perturbaciones y las de seguimiento de referencia. Para evaluar las prestaciones en el rechazo de perturbaciones, las especificaciones dinámicas más utilizadas son:

- Valor máximo de la salida ($y_{max,pert}$). Representa el valor máximo que alcanza la salida en el transitorio de respuesta ante perturbación unitaria.

- Tiempo de establecimiento ($t_{s,pert}$). Representa el tiempo que tarda la salida en bajar al 2% de su valor máximo ante perturbación unitaria.

- IAE (Integral Absoluta del Error). Es la integral del valor absoluto del error, y pretende medir lo bueno que es el sistema corrigiendo el efecto de una perturbación de tipo escalón.



ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En general, un buen compromiso entre la respuesta más rápida y el valor máximo menor se consigue cuando la Integral Absoluta del Error (IAE) ante perturbación es mínima. Si la respuesta del sistema no es muy oscilatoria, se puede aproximar esta integral absoluta del error a la integral del error:

$$IAE = \lim_{t\to\infty}\int_0^t |e(\tau)|d\tau \approx |\lim_{t\to\infty}\int_0^t e(\tau)d\tau| = IE = \frac{1}{\frac{K_p}{T_i}} = \frac{1}{K_i}$$

Por lo tanto el IE será mínimo (y aproximadamente el IAE también) si la ganancia K_i es máxima. Las propuestas de diseño de PID basadas en optimización que se describirán posteriormente para la técnica de respuesta en frecuencia, se basan todas ellas en buscar soluciones donde K_i sea máxima (ver [2]). En el caso del lugar de las raíces, la estrategia "equivalente" de respuesta óptima consistirá en buscar que la parte real de los polos dominantes sea la mayor posible, lo cual se consigue haciendo que la parte real de los polos dominantes sea similar a la parte real del siguiente polo menos dominante. Las propuestas de diseño de PID mediante el lugar de las raíces se basan en buscar soluciones donde sucede esto.

En cuanto a las especificaciones de seguimiento de referencia la más utilizada es el tiempo de establecimiento ($t_{s,98}$). El tiempo de establecimiento depende, básicamente, de la parte real de los polos dominantes de bucle cerrado, aunque también depende de los ceros del controlador, que dependen de los factores de ponderación de la referencia.

3.3 ESPECIFICACIONES DE ATENUACIÓN DEL RUIDO DE ALTA FRECUENCIA

El ruido de medida es una señal que suele ser de alta frecuencia, es decir, es una señal que cambia muy rápido. Para analizar su efecto sobre la acción de control se utiliza el concepto de ganancia a altas frecuencias que, para una función de transferencia dada $M(s)$ se define como

$$M_\infty = \lim_{s\to\infty} M(s)$$

El valor de la acción de control debida al ruido de medida $N(s)$ viene dado por

$$U(s) = \frac{-C(s)}{1 + C(s)G(s)}N(s)$$

El proceso $G(s)$ tiene generalmente más polos que ceros, con lo que la ganancia a altas frecuencias es nula ($\lim_{s\to\infty} G(s) = 0$). Debido a eso, la amplitud de la acción de control debida a un ruido unitario es:

$$u_{ruido} = \lim_{s\to\infty} C(s) = C(\infty)$$

Esta amplitud depende del tipo de controlador y vale $\boldsymbol{K_p}$ para el controlador PI, y $\boldsymbol{K_p(1+N)}$ para el PID.
Las variaciones máximas de la acción de control provocadas por el ruido en un periodo resultan de multiplicar la variación del ruido por K_p si el controlador no tiene término derivativo, y por $K_p(1+N)$ si lo tiene.

3.4 ESPECIFICACIONES DE ROBUSTEZ

Son especificaciones que indican lo lejos que está el sistema en bucle cerrado de hacerse inestable debido a un cambio en el proceso. Lo oscilatoria que es la respuesta nos da una medida de lo robusto que es un controlador. En este sentido, la sobreoscilación (δ) es una medida indirecta de robustez. El problema es que la sobreoscilación depende de la parte imaginaria de los polos dominantes, pero también de los ceros de la función de transferencia, que dependen de los factores de ponderación de la referencia. Por esta razón no es la especificación más adecuada para medir la robustez.

Las especificaciones más usadas para medir la robustez son:

- El amortiguamiento de los polos dominantes en bucle cerrado. Este parámetro se utiliza en el diseño mediante el lugar de las raíces.
- El margen de fase y de ganancia. Estos parámetros se utilizan en el diseño en frecuencia.

4 ESTRATEGIAS DE DISEÑO DE CONTROLADORES PID.

En primer lugar, para elegir el tipo de controlador (PI ó PID) hay que tener en cuenta que el término derivativo tiende a amplificar el ruido de alta frecuencia , pero permite una respuesta más rápida, y el filtro atenúa este problema.

Se puede resumir que lo más habitual si el sensor no es muy ruidoso y el sistema no tiene un retardo muy grande es elegir el controlador PID completo, con el parámetro de filtro, N adecuado al ruido, pues suele ser un buen compromiso entre rapidez de respuesta y error, mientras que si el sensor es muy ruidoso, o bien el proceso tiene un retardo muy grande, lo más común es elegir el controlador PI.

En cuanto a las técnicas de diseño de controladores PID, se van a considerar las siguientes:

- Mediante el **lugar de las raíces**. Utilizando la herramienta sisotools de Matlab.

- Mediante la **respuesta en frecuencia**. Mediante una herramienta desarrollada por el autor.

4.1 ESTRATEGIAS GENERALES DE DISEÑO DE CONTROLADORES PID

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Una vez se dispone de un modelo del proceso y de las especificaciones deseadas de respuesta, se aplica una de las técnicas de diseño para obtener el controlador $C(s)$.

Las especificaciones requeridas en el sistema controlado pueden ser valores numéricos exactos (por ejemplo $t_{s,98}<3$), o pueden expresarse como un objetivo de optimización de algún índice (por ejemplo $t_{s,98}$ mínimo). Un objetivo de control muy típico cuando se diseña un controlador es minimizar el índice IAE (optimizar la respuesta ante perturbación), pero garantizando una robustez determinada y una amplificación de ruidos menor que un límite determinado. De esa forma se conseguiría la respuesta más rápida, pero garantizando que el sistema es robusto y poco oscilatorio y la acción de control no es demasiado sensible al ruido.

Se pueden definir las especificaciones de ajuste del controlador como un triángulo de tres vértices:

- **Robustez**.
- **Rapidez de respuesta**.
- **Amplificación del ruido de alta frecuencia**.

Teniendo en cuenta estos tres vértices, se pueden plantear 3 estrategias en el diseño del PID basadas en la optimización de un índice:

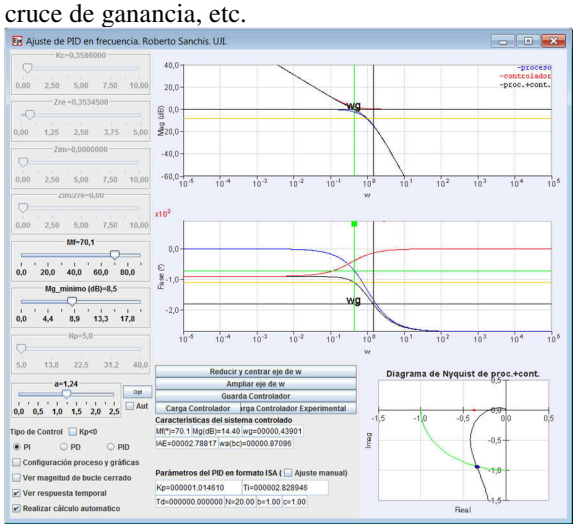
1. Fijar la robustez deseada y la amplificación del ruido máxima admisible, y **optimizar la rapidez de respuesta**. Esto implicaría o bien minimizar el IAE (maximizar K_i) ó el t_{s98} o el t_{spert} o el $y_{maxpert}$, o el ω_a, o la ω_g, según qué variable de rapidez interese más.

2. Fijar la robustez deseada y la rapidez de respuesta requerida (en términos de IAE, t_{s98}, t_{spert}, $y_{maxpert}$, ω_a, o ω_g), y **minimizar la amplificación del ruido**.

Cuál de las 2 opciones se utiliza depende de la información que se tiene del proceso a controlar y de los objetivos deseados sobre el comportamiento del sistema controlado. La idea de estas 2 estrategias es que puedan utilizarse de forma conceptualmente similar tanto mediante la técnica del lugar de las raíces como mediante la técnica de la respuesta en frecuencia. A continuación se describe cómo abordar las tres estrategias mediante la respuesta en frecuencia y mediante el lugar de las raíces.

5 DISEÑO DE PID MEDIANTE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Para el diseño de PID basado en frecuencia se propone utilizar una herramienta software, presentada en [1] (y disponible en https://sites.google.com/a/uji.es/freepidtools/) que permite de una forma sencilla obtener el PID que maximiza K_i condicionado a un margen de fase exacto deseado y un margen de ganancia mayor o igual que un mínimo requerido, según el método propuesto en [2]. Dicha aplicación permite seleccionar el parámetro del filtro del derivador, N, y los factores de ponderación de la referencia (b y c), y realiza la simulación del PID, mostrando el valor de diversas especificaciones, como el IAE, el tiempo de establecimiento, la amplitud de la acción de control debida al ruido, el ancho de banda, la frecuencia de cruce de ganancia, etc.



Utilizando esa herramienta, las 2 estrategias para el diseño del PID basado en la optimización de un índice se concretarían en este caso como:

Estrategia 1

Se trata de fijar el margen de fase exacto deseado y el margen de ganancia mínimo requerido, además de la amplificación del ruido máxima admisible, y **maximizar la ganancia K_i.**

Para resolver este problema de diseño, se fija en la aplicación el margen de fase y el margen de ganancia, y se selecciona control PI, calculando el óptimo (máximo K_i). Si la amplitud debida al ruido es demasiado alta, se desajusta el controlador PI sacándolo del óptimo, haciendo más lenta la respuesta hasta que la amplitud debida al ruido sea la requerida. Para hacer más lento el controlador PI existe un parámetro de ajuste ($a=\omega_g/z_i$) cuyo valor simplemente se reduce con una deslizadera. Si con el PI óptimo la amplitud debida al ruido es baja, pero cercana al límite, la solución es ese PI. En cambio, si la amplitud es mucho menor que la admisible, se selecciona control PID, se fija el parámetro del filtro, N, en el valor más pequeño (mucho filtrado) y se calcula el óptimo (máximo K_i) pulsando un botón. Si la amplitud de la acción de control debida al ruido sigue siendo menor que la admisible, se aumenta el parámetro del filtro, N, y se recalcula el óptimo (la herramienta lo hace de forma automática),

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

repitiéndose esta operación hasta que la amplitud de la acción de control debida al ruido sea cercana a la admisible.

Estrategia 2

Se trata de fijar el margen de fase exacto deseado y el margen de ganancia mínimo requerido, además de la rapidez de respuesta requerida, y **minimizar la amplitud de la acción de control debida al ruido**.

La rapidez requerida suele fijarse en forma de tiempo de establecimiento. Sin embargo, el tiempo de establecimiento depende de cómo se producen las oscilaciones, por lo que al variar el diseño puede tener saltos que no ayudan al diseño. Por esa razón se propone usar como especificación de rapidez en ese caso la frecuencia de cruce de ganancia, que se puede aproximar a partir del tiempo de establecimiento con una ecuación aproximada:

$$\omega_g \approx \frac{4}{t_{s,98}(2.3\xi - 0.52)}$$

Para resolver este problema de diseño, se fija en la aplicación el margen de fase y el margen de ganancia, y se selecciona control PI, calculando el óptimo (máximo K_i). Si la rapidez de respuesta es demasiado alta, se desajusta el controlador PI sacándolo del óptimo, haciendo más lenta la respuesta hasta que la rapidez de respuesta sea la requerida. Para hacer más lento el controlador PI existe un parámetro de ajuste (a=ω_g/z_i) cuyo valor simplemente se reduce con una deslizadera. Si con el PI óptimo la rapidez de respuesta no es suficiente, se selecciona control PID, se fija el parámetro del filtro, N, en el valor más pequeño (mucho filtrado) y se calcula el óptimo (máximo K_i) pulsando un botón. Si la rapidez de respuesta sigue sin ser suficiente, se aumenta el parámetro del filtro, N, y se recalcula el óptimo (la herramienta lo hace de forma automática), repitiéndose esta operación hasta que la rapidez de respuesta sea cercana a la requerida.

6 DISEÑO DE PID MEDIANTE EL LUGAR DE LAS RAÍCES

En el caso del diseño mediante al lugar de las raíces, se va a suponer que se utiliza la herramienta de Matlab Sisotools. Después se comentará qué funcionalidades que no tiene esta herramienta ayudarían a simplificar el procedimiento de diseño. Las 2 estrategias descritas antes para el diseño del PID basado en la optimización de un índice se concretarían en este caso como:

Estrategia 1

Se trata de fijar el amortiguamiento de los polos dominantes de bucle cerrado y la amplificación del ruido máxima admisible, y **maximizar la parte real de los polos dominantes.**

Para resolver este problema de diseño utilizando la herramienta Sisotools de Matlab, se fija en la aplicación el amortiguamiento deseado, y se añade un integrador y un cero (control PI). Se arrastra el cero y la ganancia hasta que los polos dominantes en bucle cerrado con el amortiguamiento deseado tienen la máxima parte real, es decir, hasta que los polos dominantes tienen una parte real similar al siguiente polo menos dominante. Si la amplitud debida al ruido es excesiva, se hace más lento el controlador PI moviendo el cero a la izquierda, haciendo más lenta la respuesta hasta que la amplitud debida al ruido sea la requerida. Si con el PI óptimo la amplitud debida al ruido es menor pero cercana a la admisible, ese PI es la solución. Si la amplitud es bastante menor que la admisible, se introduce otro cero y un polo de valor N veces el cero, con un valor N bajo (mucho filtrado). Se arrastran los ceros y el polo (manteniéndolo a N veces más o menos) hasta que los polos dominantes en bucle cerrado con el amortiguamiento deseado tienen la máxima parte real, es decir, hasta que los polos dominantes tienen una parte real similar al siguiente polo menos dominante. Se comprueba la amplitud de la acción de control debida al ruido. Si es menor que la admisible, se aumenta el parámetro del filtro, N, separando el polo de filtro a los ceros, y se recalcula el óptimo (máxima parte real de polos dominantes), repitiéndose esta operación hasta que la amplitud de la acción de control debida al ruido sea cercana a la admisible.

Estrategia 2

Se trata de fijar el amortiguamiento de los polos dominantes de bucle cerrado, además de la rapidez requerida, y **minimizar la amplificación del ruido.**

La rapidez requerida suele fijarse en forma de tiempo de establecimiento. Sin embargo, el tiempo de establecimiento depende de cómo se producen las oscilaciones, por lo que al variar el diseño puede tener saltos que no ayudan al diseño. Por esa razón se propone usar como especificación de rapidez en ese caso la parte real de los polos dominantes, que se puede obtener del tiempo de establecimiento con una ecuación aproximada:

$$\sigma \approx \frac{4}{t_{s,98}}$$

Para resolver este problema de diseño utilizando la herramienta Sisotools de Matlab, se fija en la aplicación el amortiguamiento deseado, y se añade un integrador y un cero (control PI). Se arrastra el cero y la ganancia hasta que los polos dominantes en bucle cerrado con el amortiguamiento deseado tienen la máxima parte real, es decir, hasta que los polos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dominantes tienen una parte real similar al siguiente polo menos dominante. Si la rapidez de respuesta es mayor que la requerida, se hace más lento el controlador PI moviendo el cero a la izquierda, haciendo más lenta la respuesta hasta que la rapidez de respuesta sea la requerida. Si con el PI óptimo la rapidez de respuesta es menor que la requerida, se introduce otro cero y un polo de valor N veces el cero, con un valor N bajo (mucho filtrado). Se arrastran los ceros y el polo (manteniéndolo a N veces más o menos) hasta que los polos dominantes en bucle cerrado con el amortiguamiento deseado tienen la máxima parte real, es decir, hasta que los polos dominantes tienen una parte real similar al siguiente polo menos dominante. Si la rapidez de respuesta es menor que le necesaria, se aumenta el parámetro del filtro, N, separando el polo de filtro a los ceros, y se recalcula el óptimo (máxima parte real), repitiéndose esta operación hasta que la rapidez de respuesta sea la requerida.

Como se puede concluir de manera obvia, la herramienta sisotools de Matlab no está preparada para llevar a cabo de forma sencilla los procedimientos descritos. Las características que debería tener una herramienta como ésta para simplificar la aplicación de la metodología son (por orden de prioridad):

- Permitir fijar el valor de N, es decir, que el polo de filtro cambie automáticamente al arrastrar el cero manteniendo la relación entre ellos.
- Que al arrastrar el cero, la ganancia se calcule de forma automática para que los polos tengan el amortiguamiento marcado.
- Que al cambiar el valor de N se calcule de forma automática el controlador óptimo (cero y ganancia) que hace que el amortiguamiento de los polos dominantes sea el requerido y que la parte real coincida con la del siguiente polo menos dominante.

7 EJEMPLOS

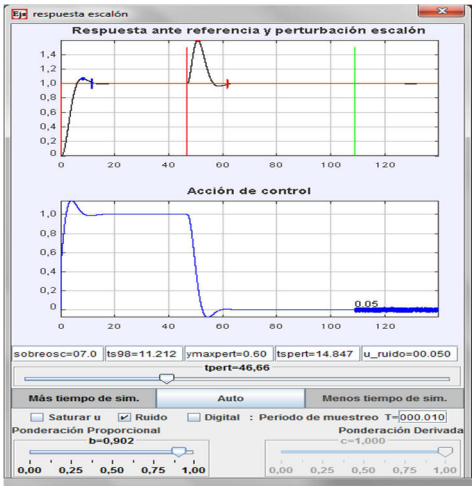
Considérese el sistema:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

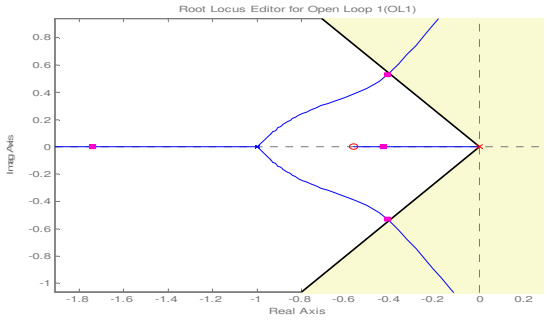
En el que se supone que el ruido del sensor tiene una amplitud 0.1 pico-pico.

Estrategia 1.

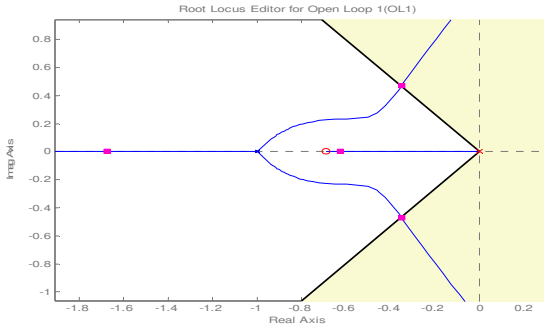
En este caso se quiere que la amplitud de la acción de control debida al ruido sea menor de 0.05, es decir, una amplificación de 0.5. Para el diseño mediante respuesta en frecuencia se fija el margen de fase en 60º, y el margen de ganancia mayor de 8 dB. Definiendo un controlador PI óptimo con la aplicación de diseño en frecuencia se obtiene una amplitud de la acción de control de 0.11, por lo que se hace más lento el diseño reduciendo el valor del parámetro a hasta que la amplitud es la deseada (0.05). El resultado es un controlador PI (K_p=0.5, T_i=1.4), con un IAE=3.13 y un $t_{s,98}$=11.2.



Utilizando el lugar de las raíces, la especificación de robustez se fija en ξ=0.6. Arrastrando el cero hasta la posición -0.54 se consigue la mayor parte real de los polos dominantes (el tercer polo tiene la misma parte real).



La ganancia es K_p=0.64, por lo que la amplitud debida al ruido es de 0.064. Para reducirla se mueve el cero a la izquierda hasta -0.688 donde se logra que K_p=0.5, es decir, la amplificación del ruido deseada.



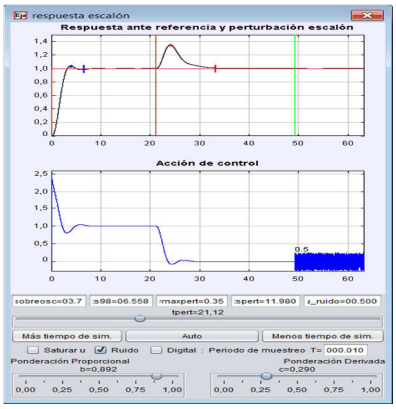
El PI resultante es K_p=0.5, T_i=1.45, es decir, prácticamente el mismo que el obtenido antes.

Estrategia 2.

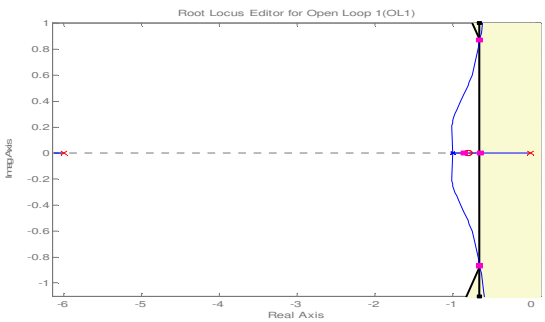
En este caso se quiere que el tiempo de establecimiento sea igual a 6 seg. Para la respuesta en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

frecuencia se fija M_f=60º, M_G>8 dB. Se traduce el tiempo de establecimiento a la frecuencia de cruce de ganancia requerida, que es ω_g= 0.775 rad/s, donde se ha aproximado $\xi \approx M_f/100$. El PI óptimo da lugar a ω_g= 0.522, es decir, no es lo bastante rápido. Se selecciona el PID óptimo con N=2, dando ω_g= 0.604. Se va aumentando el parámetro de filtro N hasta que ω_g= 0.775. Se obtiene N=4.7, y el PID: K_p=1.886, T_i=2.68, T_d=0.52, con un IAE=1.42, un t_s=6.5 (después de ajustar los factores de ponderación), y una amplitud debida al ruido de 0.5.



Para el diseño mediante el lugar de las raíces, el tiempo de establecimiento de 6 seg se traduce en una parte real de 0.66, y la robustez se fija en ξ=0.6. Con un controlador PI es imposible conseguir que los polos dominantes tengan esa parte real, por lo que se añade otro cero y un polo de filtro, de un valor inicialmente muy cercano a los ceros. Moviendo los ceros para que las ramas pasen por la parte real y amortiguamiento deseados, se obtiene un polo más lento, por lo que se va alejando el polo de filtro y reajustando hasta que los polos en la parte real y amortiguamiento buscados son los dominantes, y el tercer polo tiene una parte real similar. En este caso se consigue con N=7.5:



El PID resultante es: K_p=1.5, T_i=2.33, T_d=0.5, que es un controlador similar al obtenido mediante la respuesta en frecuencia, con un t_s=5.5 seg.

8 CONCLUSIONES

En este trabajo se han planteado estrategias de diseño de controladores PID que se pueden aplicar tanto mediante la técnica de respuesta en frecuencia como mediante el lugar de las raíces, siendo los procedimientos conceptualmente similares. La idea se basa en buscar un compromiso entre tres factores: robustez, rapidez de respuesta y amplificación de ruidos. Las dos estrategias propuestas se basan en fijar dos de esos factores en valores requeridos, y optimizar el tercero. La primera consiste en maximizar la rapidez de respuesta manteniendo una robustez determinada y una amplificación máxima admisible del ruido. En la segunda se minimiza la amplitud debida al ruido manteniendo una robustez y una rapidez de respuesta determinadas. Las especificaciones utilizadas difieren en función de la técnica de diseño. En frecuencia la robustez de mide con el margen de fase y ganancia, mientras que en el lugar de las raíces se mide con el amortiguamiento. La rapidez de respuesta se mide en frecuencia con la aproximación del IAE mediante la ganancia integral, $1/K_i$, mientras que en el lugar de las raíces se usa la parte real de los polos dominantes. La amplificación del ruido se evalúa en los dos casos como la ganancia a altas frecuencias del controlador. La herramienta utilizada para el diseño en frecuencia permite implementar el procedimiento de forma sencilla. Sin embargo la herramienta sisotools de Matlab no está preparada para esta metodología, siendo bastante engorroso su uso, por lo que se explican los cambios que debería incorporar dicha aplicación para simplificar su uso con esta propuesta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto MICINN número DPI2011-27845-C02-0.

Referencias

[1] Sanchis, R. y Estupiña, S. (2013) Herramientas de hardware y software libre para la identificación experimental, el diseño y la implementación de controladores pid. Jornadas de Automática 2013. https://sites.google.com/a/uji.es/freepidtools/

[2] Sanchis, R., Romero, J. and Balaguer, P. (2010) "Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimisation", *International Journal of Control,* Vol. 83 (Issue 9),pp. 1785-1798. DOI: 10.1080/00207179.2010.495162.

[3] Ogata, K., (2003) Modern Control Engineering.

[4] D'azzo-Houpis, (1992) Sistemas de Control Realimentados.

[5] Phillips, C.L., Troy H., Sistemas de Control Digital. Análisis y Diseño.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA EL DESARROLLO DE EXOESQUELETOS BASADA EN MATLAB-SIMULINK

Dorin-Sabin Copaci, Antonio Flores-Caballero
Dolores Blanco, Luis Moreno
Avda. de la Universidad, 30 Leganés (Madrid)
dcopaci@ing.uc3m.es, afcaball@ing.uc3m.es, dblanco@ing.uc3m.es, moreno@ing.uc3m.es

Resumen

Este artículo presenta un sistema de simulación completamente basado en Matlab-Simulink para el análisis de la actuación de un exoesqueleto de rehabilitación. Se ha desarrollado un modelo capaz de simular el funcionamiento de un exoesqueleto de rehabilitación para la articulación del codo en conjunción con el modelo simulado del cuerpo humano (BoB, Biomechanics of Bodies). Para conectar el modelo del exoesqueleto al modelo del cuerpo humano se ha desarrollado una conexión viscoelástica. El entorno complejo de simulación que se propone permite llevar a cabo el análisis biomecánico del comportamiento del cuerpo humano sometido a la acción del exoesqueleto en diferentes tareas de rehabilitación.

Este trabajo se ha desarrollado completamente en Matlab/Simulink, usando varias toolboxes para Matlab.

Palabras clave: Simulador musculoesquelético, Exoesqueletos, Matlab-Simulink.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día en el desarrollo de cualquier sistema robótico juegan un papel fundamental las herramientas de simulación que permiten analizar el funcionamiento esperado de los sistemas diseñados antes de su fabricación. En el caso del diseño de exoesqueletos robóticos, el sistema cinemático y dinámico completo cuyo funcionamiento hemos de simular está compuesto por dos elementos que actúan conjuntamente: el exoesqueleto y el cuerpo humano. Para mejorar la fase de diseño del exoesqueleto es necesario analizar el efecto que la acción del exoesqueleto tendrá sobre el movimiento del cuerpo humano y también disponer de un modelo completo que permita estimar qué acción debe realizar el sistema robótico para que el paciente sobre el que actúa realice la tarea requerida. El análisis del funcionamiento del sistema requiere por tanto, disponer de un simulador del comportamiento del cuerpo humano y de una herramienta para simular el comportamiento del exoesqueleto. Además, y este es el punto central del trabajo que aquí se presenta, se requiere que ambas herramientas se integren de forma que se puede simular y analizar todo el conjunto.

Los prototipos virtuales se han usado por muchos investigadores para estudiar el movimiento humano, dichos prototipos se construyen sobre modelos matemáticos para simulación mecánica. Existen varias herramientas software que son capaces de analizar el comportamiento biomecánico del cuerpo humano, entre las que destacan AnyBody [4], MSMS [2] [3], BoB [7],OpenSim and SIMM [5],[6]. Puede verse una breve comparación entre estas herramientas en *Consistency Among Musculoskeletal Models: Caveat Utilitor*[8].

Debido a las capacidades para la simulación de sistemas complejos y cálculos numéricos, se ha elegido Matlab/Simulink para el modelo del exoesqueleto, herramienta de simulación de uso muy extendido en el desarrollo de sistemas de control. Simulink combina una interfaz por medio de diagramas de bloques y capacidad para simular sistemas con las funcionalidades de Matlab. Los modelos del exoesqueleto y sus actuadores han sido desarrollados en Matlab/Simulink.

Por otra parte se ha seleccionado el software BoB para la simulación musculoesquelética, también basado en Matlab/Simulink. De esta forma todo el modelado puede hacerse en el mismo entorno, esto permite ajustar el diseño del exoesqueleto, la selección de los actuadores y el ajuste de los algoritmos de control de los mismos con el mismo software. Así se excluye la posibilidad de incompatibilidaddes entre diferentes herramientas software en el caso de co-simulación, eliminando los posibles errores derivados de esta situación.

Este entorno permite el análisis del comportamiento biomecánico del cuerpo humano, el comportamiento del exoesqueleto y sus actuadores, considerando una interacción viscoelástica entre exoesqueleto y cuerpo humano que representará el efecto de piel, tejidos del cuerpo y del revestimiento del exoesqueleto. El entorno de simulación desarrollado permite desarrollar nuevos algoritmos de control para los actuadores del exoesqueleto cuan-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

do actúa en contacto directo con el cuerpo.

2. BoB

Biomechanics of Bodies (BoB) es el sistema de modelado musculoesquelético humano en Matlab/Simulink. BoB está compuesto de 36 segmentos del esqueleto y 666 músculos (http://biomch-l.isbweb.org/threads/24381 - Biomechanical-analysis-within-Matlab-Simulink). Ha sido desarrollado en la Coventry University, Reino Unido y tiene dos versiones: una para la dinámica inversa y otra para la dinámica directa. En el modelo dinámico inverso, BoB puede calcular los pares de las articulaciones, distribución de carga muscular y fuerzas de contacto en las articulaciones. En el modelo dinámico directo, BoB puede calcular el movimiento causado por la activación de los músculos y la acción de fuerzas externas. BoB tiene también grandes capacidades gráficas y de post-procesamiento.

Ya que BoB está desarrollado completamente en Matlab se requiere un mínimo aprendizaje para los usuarios habituales de este software, lo que hace esta herramienta especialmente útil para los especialistas en robótica y control. Además, BoB puede integrarse en los modelos de Simulink existentes que requieran considerar la componente humana. Esta aplicación se ha utilizado en trabajos como: *Calculation of Muscle Loading and Joint Contact Forces in Irish Dance* [7] [11], *Biomechanical analysis of entry, egress and loading of a passenger vehicle with rear hinged rear doors* [12] y *FES rowing biomechanics: fixed and floating stretcher ergometers* [13].

En este trabajo se usa la versión de la dinámica directa. Este modelo tiene varias entradas entre ellas el peso de la persona, señales de activación muscular, fuerzas externas aplicadas sobre los huesos, inercia y las señales que representan los movimientos del cuerpo rígido (rigid body movement, RBM), definidas por el movimiento de rotación y de translación de la pelvis. Mediante estas entradas se configura el modelo del cuerpo humano. La interfaz gráfica de BoB® se muestra en la figura 1.

2.1. Configuració del modelo en BoB

El modelo del cuerpo humano de BoB (BoB forward) puede simular la dinámica directa del cuerpo. Este modelo consiste en un bloque compilado de Matlab con varias entradas y salidas, entre las que pueden distinguirse: una entrada para la fuerza muscular, 15 entradas para fuerzas externas aplicadas sobre los segmentos del modelo que representan los huesos, 15 entradas para la

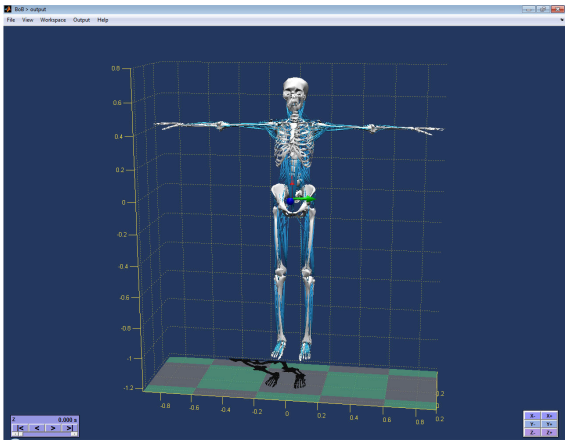


Figura 1: Interfaz de BoB.

inercia de los segmentos, una entrada para la masa del cuerpo de la persona y una entrada para RBM. El puerto de salida se usa para adquisición de datos necesarios para la interfz gráfica y post-procesamiento.

La posición inicial del modelo músculo-esquelético (posición en el instante $t = 0$) es la que se observa en la figura 1. En ausencia de fuerzas musculares y de fuerzas externas, el modelo cae a causa de la gravedad.

3. Conexión exoesqueleto - cuerpo humano

La mayoría de las estrategias de control de los exosqueletos para rehabilitación incorporan un controlador de fuerza. El par necesario para generar el movimiento, se trasmitiría del actuador a través de los puntos de contacto entre el exoesqueleto y el cuerpo humano a las articulaciones. Esto presupone que el motor no va a generar el par directamente en la articulación y que el par se va transmitir, en el caso desarrollado en este artículo para la articulación del codo, a través de los puntos de contacto del brazo y antebrazo con el exosqueleto.

El primer paso en el desarrollo de este entorno de simulación es conectar el modelo del exoesqueleto con el modelo músculo-esquelético usando los puertos de entrada del modelo de BoB, en este caso, las entradas para fuerzas externas. Además, es necesario actuar con fuerzas externas sobre los puertos del modelo para mantenerlo fijo en el espacio de forma que podamos trabajar sólo sobre la extremidad superior. Para simular estas conexiones utilizaremos un sistema muelle-amortiguador. Un muelle es un elemento mecánico que almacena energia. El componente amortiguador tiene el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

efecto de reducir, restringir o prevenir las oscilaciones del sistema.

La Ley de Hook nos da la deformación de un material elástico sometido a una fuerza. La fuerza necesaria para extender o comprimir un muelle una distancia x es proporcional a la distancia según:

$$F_s = k * x \tag{1}$$

donde F_s es la fuerza, k es constante del muelle y x la elongación del muelle. Si en la ecuación 1 añadimos la componente del amortiguador obtendremos:

$$F_t = k * x + c * \dot{x} \tag{2}$$

donde F_t es la fuerza del conjunto muelle-amortiguador, k es la constante del muelle, c es el coeficiente de viscosidad del amortiguador y x es la elongación del muelle.

Conociendo las coordenadas iniciales de las articulaciones, el objetivo consistiría en conectar este punto de coordenadas iniciales con las coordenadas estáticas por el intermedio de muelles amortiguadores. La entrada para este tipo de sistemas son las coordenadas del punto fijo y las coordenadas de la posición real del segmento, calculándose la extensión del muelle en función de estos (ecuación 2). Para representar las coordenadas de punto fijo se utilizan los bloques de la toolbox SimMechanics, que nos da como salida una señal de tipo SimMechanics. Por otra parte la entrada en fuerza sobre el segmento acepta solo señales de tipo Simulink. Por esta razón ha sido necesario desarrollar un sistema muelle amortiguador capaz de recibir dos tipos de señales (SimMechanics y Simulink) para mantener el cuerpo fijo en el espacio. El sistema muelle amortiguador se puede ver en figura 2.

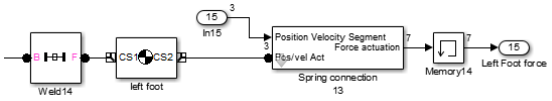


Figura 2: Sistemas muelle amortiguador. Conexión entre un punto fijo y el pie izquierdo del cuerpo humano.

La configuración de los sistemas muelle-amortiguador consiste en determinar los coeficientes k y c. Para cada segmento, el coeficiente del muelle se ha determinado en función de su peso. La masa de cada segmento se calcula en función de la masa total del cuerpo:

$$m_i = P_i X m_{totalbody} \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = 1{,}000 \tag{4}$$

$$m_{totalbody} = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{5}$$

donde m_i es la masa del segmento i, P_i es la proporción de masa del segmento i [1], n es el número de segmentos del cuerpo, y $m_{totalbody}$ es la masa total del cuerpo.

El coeficiente del amortiguador se estableció en función del parámetro ζ (equation 6) con la condición de sobreoscilación.

$$\zeta = \frac{c_i}{\sqrt{m_s * k_i}} \tag{6}$$

donde c_i es la constante de viscosidad del amortiguador del segmento i , en $N*s/m$, m_s es la masa del segmento y k_i es la constante del muelle del segmento i.

Los modelos muelle-amortiguador actuando sobre BoB pueden verse en la figura 3. Como puede verse en la imagen estos son capaces de mantener el cuerpo fijo en el espacio bajo la acción de la gravedad.

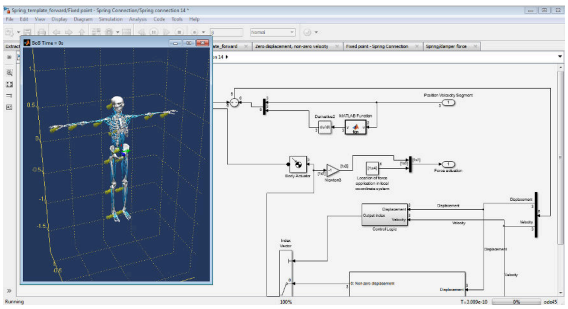


Figura 3: Fuerzas del sistema muelle amortiguador actuando sobre BoB.

La simulación propuesta se usará para diseñar un exoesqueleto para rehabilitación del codo. Por esta razón, todas las articulaciones del modelo se fijan en el espacio por medio de sistemas muelle-amortiguador, liberando únicamente la mano a través de la articulación de la muñeca.

4. Modelo del exoesqueleto

El modelo del exoesqueleto se ha construido en Solidworks. Con la opción de SimMechanics Link se ha exportado el modelo al entorno SimMechanics. El exoesquelto se ha posicionado como sigue: la posición del hombro del exoesqueleto coincide

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

con el punto fijado de la articulación del hombro y la posición del codo del exoesqueleto coincide con el punto fijado para la articulación del codo. Entre los puntos del modelo musculo-esqueletico y los puntos fijados hay una distancia de $1cm$. La fuerza que ejerce el exoesqueleto sobre la extremidad superior se transmite a través de la entrada en fuerza de la mano, a una distancia variable de la articulación de muñeca. En este caso, la distancia entre la articulación de la muñeca y el punto de aplicación de la fuerza donde ejerce el exosqueleto sobre el antebrazo es de $10cm$.

La posición del brazo y el exoesqueleto con el sistema muelle-amortiguador puede verse en la figura 4.

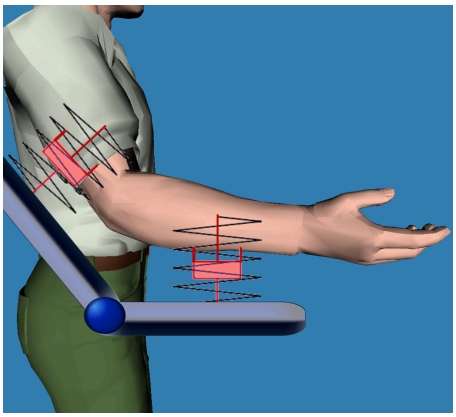


Figura 4: Conexión muelle amortiguador entre el miembro superior y exosqueleto

El modelo SimMechanics para exoesqueleto del miembro superior puede verse en la figura 5.

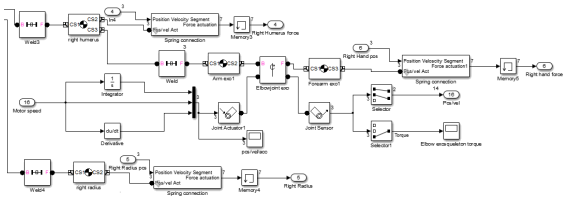


Figura 5: El modelo del exosqueleto de rehabilitación para la articulación del codo en SimMechanics.

En el caso del sistema muelle amortiguador encargado de transmitir la fuerza que ejerce el exosqueleto sobre la extremidad superior, los parámetros del muelle amortiguador deberían tener cuenta los efectos de los tejidos blandos del cuerpo y el recubrimiento del exosqueleto. En este sentido las constantes k y c se ajustan en función de estos tejidos. Por otra parte se ha tenido en cuenta que una vez que los tejidos están comprimidos a máximo (un desplazamiento x=máximo) a causa de la fuerza ejercida por el exosqueleto, existe una fuerza de reacción en el cuerpo humano que no permite que el exosqueleto perfore el tejido blando. La elección de los parámetros que modelan estos aspectos es uno de los puntos clave para poder analizar el comportamiento del exosqueleto sobre el cuerpo humano.

En este artículo se ha usado un exoesqueleto de prueba que todavía no está listo para una simulaciń real pero que permite ser configurado de forma sencilla. En la figura 6 se puede observar el esquema de bloques de Simulink y SimMechanics que caracteriza el comportamiento del sistema muelle - amortiguador.

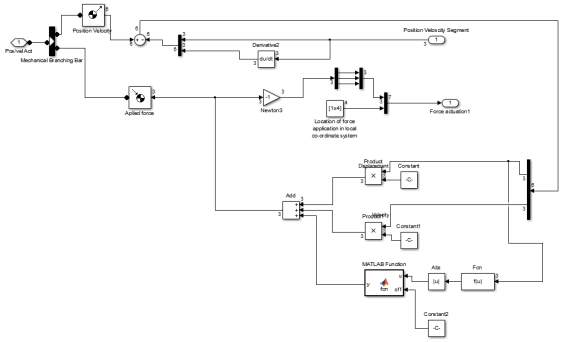


Figura 6: Sistema muelle amortiguador para transmisión de fuerza desde exosqueleto al miembro superior

5. Conclusiones

Este artículo presenta un nuevo entorno de simulación basado en el software BoB, que permite el análisis del comportamiento de un exoesqueleto, incluyendo el comportamiento de sus actuadores, actuando sobre el cuerpo humano.

En este entorno de simulación se pueden considerar diferentes condiciones de activación muscular representando la capacidad residual de pacientes afectados por distintas lesiones, por ejemplo, pacientes que tienen una función parcial del miembro superior tras una lesión medular (SCI, Spinal Cord Injury).

La interfaz desarrollada da la posibilidad de configurar el exoesqueleto y el tipo de actuador de una forma sencilla, permitiendo desarrollar nuevos algoritmos de control que mejoren el funcionamiento del sistema completo para las tareas de rehabilitación previstas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competiti-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

vidad gracias al proyecto HYPER del programa CONSOLIDER-INGENIO2010; y por la Comunidad de Madrid a través del programa RoboCity2030-II-CM.

Referencias

[1] Clauser, Charles E. ; McConville, John T. ; Young, J. W.;Weight, volume, and center of mass of segments of the human body *Air Force Systems Command Wright- Patterson Air Force Base, Ohio* 1969

[2] Davoodi, R.; Urata, C.; Todorov, E.; Loeb, G.E; Development of clinician-friendly software for musculoskeletal modeling and control *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE* 2004

[3] Khachani,M.; Davoodi, R.; Loeb, G; Musculo-Skeletal Modeling Software (MSMS) for Biomechanics and Virtual Rehabilitation, *IEEE Trans. Biomedical Eng.* 2000

[4] Michael Damsgaard; John Rasmussen; Soren Torholm Christensen; Egidijus Surma; Mark de Zee; Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System, 2006

[5] Scott L. Delp; Frank C. Anderson; Allison S. Arnold; Peter Loan; Ayman Habib; Chand T. John; Eran Guendelman; Darryl G. Thelen; OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement *IEEE Trans. Biomed. Eng.54:1940-1950* 2007

[6] Scott L. Delp; Peter Loan; A graphics-based software system to develop and analyze models of musculoskeletal structures. *Comput. Biol. Med. 25:21-34* 1995

[7] Shippen, J.M.; May, B.; Calculation of Muscle Loading and Joint Contact Forces in Irish Dance; *Journal of Dance Medicine and Science* 2010

[8] Wagner, D.W.; Stepanyan, V.; Shippen, J.M.; DeMers, M.S.; Gibbons, R.S.; Andrews, B.J.; Creasey, G.H.; Beaupre, G.S.; Consistency Among Musculoskeletal Models: Caveat Utilitor. *Annals of Biomedical Engineering 41 (8), 1787-1799.* 2013

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Reconstrucción cinemática del brazo humano mediante matrices de transformación

J.M. Catalán, R. Morales, L.D. Lledó, J.A. Díez, J.M. Sabater, N. García-Aracil
Neuroingeneiría Biomédica, Universidad Miguel Hernández de Elche
email: jose.catalan@goumh.umh.es, nicolas.garcia@umh.es

Resumen

En este artículo se presenta un método para la reconstrucción cinemática del brazo humano orientado a tareas de neuro-rehabilitación asistida por robots. La finalidad es obtener una aproximación a los movimientos del brazo de un paciente durante la administración de la terápia, con la intención de poder extraer datos clave que permitan cuantificar y evaluar de forma objetiva la calidad de la terapia. Para ello, se emplean tres Unidades Inerciales (IMU: Inertial Measurement Unit) como sistemas de referencia independientes colocados en lugares claves del brazo del paciente, para a partir de la dinámica de estos dispositivos, reconstruir el modelo cinemático simplificado de siete Grados de Libertad (GDL) del brazo del paciente.

1. Introducción

Actualmente, la robótica aborda nuevos campos de aplicación con objetivos muy diversos. Un ejemplo de ello, es la neuro-rehabilitación, donde un terapeuta con la ayuda de un robot aplica sesiones de rehabilitación con el objetivo de maximizar la movilidad perdida de algún miembro del paciente [1, 2]. La robótica aplicada sobre este campo puede, además, proveer nuevas herramientas para la evaluación de la evolución del paciente, aportando datos más objetivos que los empleados hasta la fecha por los propios terapeutas [3].

Una de las problemáticas en la administración de terapias de neuro-rehabilitación asistida por robots de configuración de efector final, donde el contacto entre el robot y el paciente se realiza a través de un único punto, es la imposibilidad de determinar la configuración cinemática del brazo del paciente [4]. Está información es necesaria tanto por motivos de seguridad como para la evaluación de la eficacia de la terapia y el progreso del paciente. Para solventar este inconveniente se propone emplear Unidades Magentico Inerciales (IMUs) con el fin de determinar la configuración cinemática del brazo paciente para proporcionar información robusta y objetiva al terapeuta.

El método desarrollado en este artículo consiste en relacionar directamente la información cinemática de los sistemas de referencia de tres unidades inerciales colocadas en una posición fija en el brazo del paciente con el modelo cinemático del brazo humano para obtener su posición en el espacio. Con esto queremos desarrollar una herramienta que no solo nos permita obtener una representación virtual de los movimientos del paciente, sino que además nos sirva para extraer información sobre las articulaciones del brazo del paciente mientras realiza los ejercicios, y así poder tener una valoración objetiva de la eficiencia de las terapias.

1.1. Modelo cinemático del brazo humano

Debido a la dificultad que implica reconstruir el modelo cinemático que implementa todos los movimientos del brazo humano, se emplea el modelo cinemático simplificado de siete Grados de Libertad (GDL) que se muestra en la Figura 1.

Tal y como puede observarse en la Figura 1, el modelo consta de una sucesión en cadena de siete GDL.

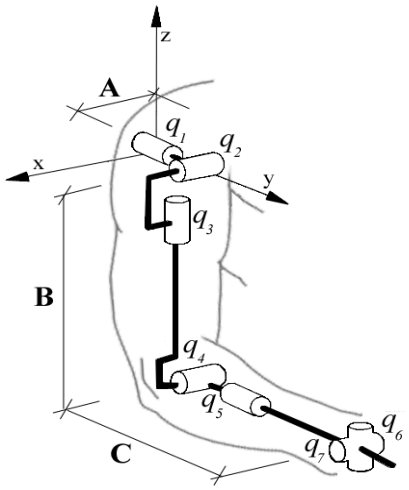


Figura 1: Descripción gráfica del modelo cinemático simplificado de 7 GDL empleado.

Tal y como se muestra en la Figura 2,a cada una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de las articulaciones del modelo le corresponde un sistema de referencia independiente.

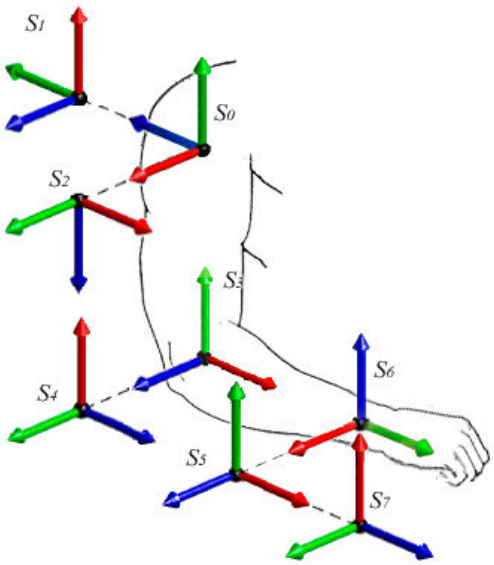


Figura 2: Sistemas de referencia de las articulaciones del modelo cinemático simplificado.

2. Unidades Inerciales

Las unidades inerciales necesarias para este método constan de 6 o 9 grados de libertad (DoF: Degrees of Freedom). Esto significan que pueden ser dispositivos IMU, de un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes, o dispositivos MARG (Magnetic, Angular Rate, and Gravity) que además de estos dos sensores incorporan un magnetómetro también de tres ejes. De esta manera, utilizando cualquiera de los dos tipos mencionados anteriormente, la información cinemática obtenida de las IMUs corresponderá a un espacio de tres dimensiones. Los datos de los sensores están referenciados con respecto al sistema de referencia del campo magnético terrestre (Ver Fig.3). Esto quiere decir que la matriz de transformación resultante estará referenciada al sistema de referencia terrestre.

2.1. Algoritmo de Sebastian O.H. Madgwick

El algoritmo desarrollado por Sebastian O.H. Madgwick [5] es un filtro de orientación aplicable a IMUs y a dispositivos MARG. Este filtro compensa la deriva térmica del giroscopio y elimina la distorsión magnética del magnetómetro además

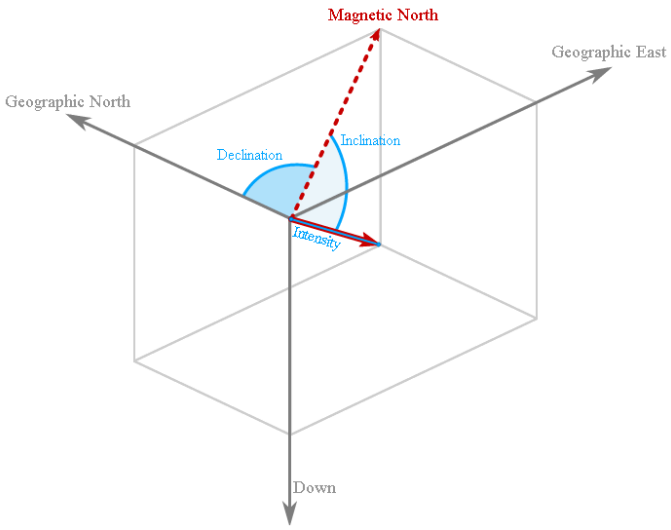


Figura 3: Sistema de referencia del campo magnético terrestre.

de permitir obtener el vector de cuaternios q resultante del movimiento del dispositivo en el espacio con respecto al sistema de referencia del campo magnético terrestre. En este método se implementa este filtro para aplicarlo independientemente a cada una de las matrices de transformación adquiridas de las IMUs.

$$q = [q_w + iq_x + jq_y + kq_z]; \quad (1)$$

Sebastian O.H. Madgwick, también realizó una implementación del filtro de Mahony [6], por lo que este método permitirá seleccionar entre los dos algoritmos que este nos proporciona.

2.2. Matriz de transformación

A partir del vector de cuaternios q que proporciona el filtro de Madgwick, se obtiene su matriz de transformación correspondiente. Para ello se realizará la conversión del cuaternio a la matriz de transformación homogénea representada en la Ecuación 2.

2.3. Inicialización de las IMUs

Dado que la aplicación de los filtros de Mahony y Madgwick toman como sistema de referencia ortonormal el formado por la línea del campo magnético terreste y el vector de gravedad, es necesario definir una serie de matrices de inicialización que permitan orientar los sistemas de referencia de las IMUs en función la orientación en la que se ubica el paciente, con la finalidad de evitar la dependencia con el norte terrestre que se provoca al adquirir

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$ {}^{w}T_{imu} = \begin{pmatrix} 1-2q_y^2-2q_z^2 & 2q_xq_y-2q_zq_w & 2q_xq_z+2q_yq_w & 0 \\ 2q_xq_y+2q_zq_w & 1-2q_x^2-2q_z^2 & 2q_yq_z-2q_xq_w & 0 \\ 2q_xq_z-2q_yq_w & 2q_yq_z+2q_xq_w & 1-2q_x^2-2q_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2) $$

la información de estas referenciada con respecto al sistema de referencia del campo magnético terrestre. Para ello se fijara como sistema de referencia el de la aplicación. En nuestro caso, como se trabaja con Matlab®, se elegirá como sistema de referencia el valor nulo del sistema de visualización.

Primero se fijará una posición de inicialización a la que se debe recurrir cuando se realice la conexión de las IMUs con Matlab®. En esta posición, se obtendrá una primera matriz de transformación de la IMU llamada ${}^{w_S}T_S$. Con ella se obtiene la matriz de inicialización ${}^{0}T_{w_S}$ a partir del calculo de su inversa:

$$ {}^{0}T_{w_{S_1}} = ({}^{w_{S_1}}T_{S_1})^{-1} \quad (3) $$
$$ {}^{0}T_{w_{S_1}} = ({}^{w_{S_2}}T_{S_2})^{-1} \quad (4) $$
$$ {}^{0}T_{w_{S_1}} = ({}^{w_{S_3}}T_{S_3})^{-1} \quad (5) $$

2.3.1. Posición de las IMU en el brazo

El posicionamiento de las IMUs en el brazo del paciente obliga a definir tres matrices de transformación (una por cada IMU) que hacen referencia a los dispositivos con respecto la posición de inicialización de nuestra aplicación. A estas matrices se las llamará ${}^{H}T_0$ (para la IMU del hombro) ${}^{C}T_0$ (para la IMU del codo) y ${}^{M}T_0$ (para la IMU de la Mano). En la Figura 4 puede observarse un ejemplo de la disposición de las IMUs en el brazo.

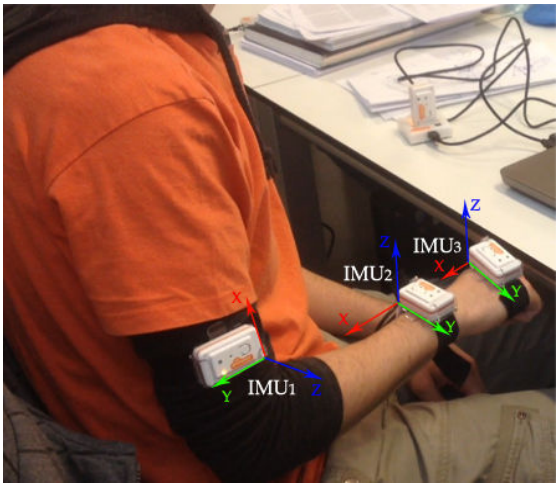


Figura 4: Ejemplo de posicionamiento de las IMUs

2.4. Cadena de inicialización

Llegados a este punto, se define una matriz de transformación T_S para cada una de las IMUs que resulta de la acumulación de las transformaciones mencionadas en las secciones anteriores y que servirá para inicializar cada IMU para la aplicación:

$$ T_{S_1} = {}^{H}T_0 \; {}^{0}T_{w_{S_1}} \; {}^{w_{S_1}}T_{S_1} \quad (6) $$
$$ T_{S_2} = {}^{C}T_0 \; {}^{0}T_{w_{S_2}} \; {}^{w_{S_2}}T_{S_2} \quad (7) $$
$$ T_{S_3} = {}^{M}T_0 \; {}^{0}T_{w_{S_3}} \; {}^{w_{S_3}}T_{S_3} \quad (8) $$

Siendo H el sistema de referencia del hombro, C el del codo y M el de la muñeca, tenemos una primera matriz que nos relaciona la posición de la IMU en el brazo del paciente con la posición inicial de nuestra aplicación. Los sistemas de referencia ${}^{0}T_{w_{S_i}}$ donde para $i = 1, 2, 3$ corresponden a las matrices que relacionan el sistema de referencia global de la IMU con la posición inicial definida para nuestra aplicación. Finalmente ${}^{w_{S_i}}T_{S_i}$ representa la rotación de la IMU correspondiente en el sistema de referencia terrestre.

3. Implementación Mediante Matrices de Transformación

Teniendo la información de las IMUs referenciada con respecto la aplicación, solo queda aplicar las transformaciones sufridas por los dispositivos en tiempo real a un modelo virtual que nos permita visualizar los movimientos del brazo del paciente. El método empleado para reconstruir los movimientos mediante estas matrices de transformación es el siguiente.

Partiendo de los sistemas de referencia de las articulaciones del brazo que se observan en la Figura 2, se aplicarán las transformaciones de cada IMU a un segmento distinto del brazo. Dividiremos el brazo en tres bloques tal y como se observa en la Figura 5.

A cada uno de estos bloques, le asignaremos un sistema de referencia independiente de los que se muestran en la Figura 5 y a los que aplicaremos la matriz de transformación correspondiente. Estos sistemas de referencia no dependen del método planteado en este artículo, por lo que se escogerá aquel que convenga para la aplicación final.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

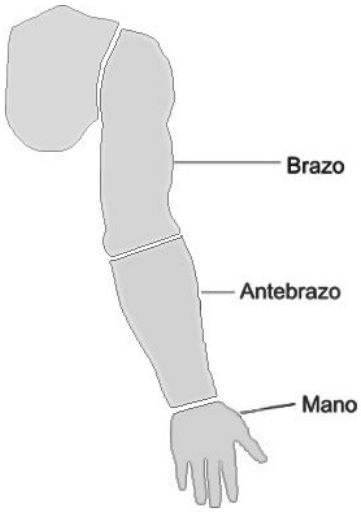


Figura 5: Representación de los bloques móviles del brazo

3.1. Cadenas de transformación

Suponiendo que la información obtenida de las IMUs ya ha sido referencia con nuestra aplicación,se implementará una cadena de transformaciones que partiendo de nuestro sistema de referencia inicial nos permita llegar al sistema de referencia escogido para cada bloque. Sin embargo debe tenerse en cuenta las siguientes condiciones. La manera de aplicar las tranformaciones de las IMUs al modelo del brazo, siempre se definirá comenzando por el hombro, siguiendo con el codo y acabando con la mano. Esto es a causa de que las posiciones en el espacio de la mano y el codo, se ven afectadas por el movimiento del hombro, de la misma manera que la posición de la mano se ve afectada por los movimientos del hombro y el codo. La segunda cosa que debe tenerse en cuenta son el uso de las matrices de inicialización de cada IMU. Observemos como ejemplo el desarrollo de la cadena de transformaciones para el hombro:

$$ {}^{0}T_{H} = {}^{0}T_{w}\ {}^{w}T_{S_1}\ \left(T_{S_1}\ {}^{S_1}T_{H}\right) \tag{9} $$

Siendo ${}^{w}T_{S_1}$ la rotación de la IMU localizada en el bloque del hombro, se le aplica la transformación T_{S_1}, correspondiente a la cadena de inicialización definida en secciones anteriores, y ${}^{S_1}T_{H}$, la matriz que relaciona el sistema de referencia de esta IMU con el escogido para dicho bloque. La matriz ${}^{w}T_{S_1}$ relaciona el sistema de referencia de la IMU con el global de nuestra aplicación. Y por último, la matriz ${}^{0}T_{H}$ relaciona el sistema de referencia global de nuestro modelo con el de inicilización que se definió en secciones anteriores. De esta manera obtenemos la matriz ${}^{0}T_{H}$.

Partiendo de esta cadena, y utilizando el mismo método definido anteriormente, calcularemos la del codo:

$$ {}^{0}T_{C} = {}^{0}T_{H}\ {}^{H}T_{S_2}\ \left(T_{S_2}\ {}^{S_2}T_{C}\right) \tag{10} $$

El problema reside en la aplicación de ${}^{0}T_{H}$ para el calculo de ${}^{0}T_{C}$. El uso de la cadena del hombro es necesario, ya que como se ha comentado previamente en este mismo capitulo, los movimientos del hombro influyen en la posición del codo en el espacio y por tanto en la cadena que queremos calcular. Para el calculo de la cadena ${}^{0}T_{H}$ que se ha definido anteriormente, se aplica la matriz de transformación T_{S_1}, que como se ha explicado en secciones anteriores, corresponde con la matriz de inicialización calculada para la matriz del hombro (Ver sección 2.4). Al aplicar la cadena del hombro para el calculo del codo estamos aplicando innecesariamente esta matriz. Esto nos provocará una transformación errónea, por lo que se debe eliminar su efecto.

$$ {}^{0}T_{C} = {}^{0}T_{H}\ {}^{H}T_{S_2}\ \left(T_{S_1}^{-1}\ T_{S_2}\ {}^{S_2}T_{C}\right) \tag{11} $$

De la misma forma que se ha hecho con la cadena del codo, se procede con la de la mano:

$$ {}^{0}T_{M} = {}^{0}T_{C}\ {}^{C}T_{S_3}\ \left(T_{S_2}^{-1}\ T_{S_3}\ {}^{S_3}T_{M}\right) \tag{12} $$

4. Obtención de las coordenadas articulares

Obtenidas las matrices de transformación que relacionan la posición y orientación de los puntos hombro, codo y mano; ${}^{0}T_{H}$, ${}^{0}T_{C}$ y ${}^{0}T_{M}$ respectivamente, es posible calcular los valores cinemáticos de las articulaciones del brazo por medios analíticos como se describe en este apartado.

Dado que la articulación del hombro está formada por las tres primeras articulaciones en configuración esférica según el modelo cinemático presentado, se puede determinar que la rotación del sistema de coordenadas del codo respecto al sistema de coordenadas del codo tendrá la forma:

$$ {}^{H}R_{C}\left(q_1,q_2,q_3\right) = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \\ o_x & o_y & o_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} \tag{13} $$

Donde la matriz ${}^{h}R_{c}$ se obtiene extrayendo la matriz de rotación de la matriz de transformación definida por:

$$ {}^{H}T_{C} = {}^{0}T_{H}^{-1}\ {}^{0}T_{C} \tag{14} $$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Por tanto, los valores articulares del hombro (q_1, q_2 y q_3) se obtienen analíticamente para el rango $[0 \quad \pi]$ mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} q_1 &= \text{atan2}\left(-n_y, o_y\right) \\ q_2 &= \text{atan2}\left(a_y, \sqrt{n_y^2 + o_y^2}\right) \\ q_3 &= \text{atan2}\left(a_z, -a_x\right) \end{aligned} \tag{15}$$

y para $q_2 \in [-\pi \quad 0]$:

$$\begin{aligned} q_1 &= \text{atan2}\left(n_y, -o_y\right) \\ q_2 &= \text{atan2}\left(a_y, -\sqrt{n_y^2 + o_y^2}\right) \\ q_3 &= \text{atan2}\left(-a_z, a_x\right) \end{aligned} \tag{16}$$

Como puede observarse se obtienen dos posibles soluciones debido a que la articulación del hombro se trata de una articulación esférica.

Por otra parte, la variable articular q_4 influye sobre la distancia del segmento $\overline{HM}$ y, por tanto, puede ser obtenida directamente. Considerando el vector normal, del plano que contiene el punto hombro, codo y muñeca paralelo al eje de rotación del codo, la variable articular q_4 puede ser calculada mediante la ley de cosenos:

$$q_4 = \arcsin\left(\frac{l_u^2 + l_f^2 - ||M - H||^2}{2 l_u l_f}\right) \tag{17}$$

Donde H y M corresponde al vector de posición del hombro y de la mano con respecto al sistema de coordenadas del hombro. Esta ecuación al tratarse de un arcoseno, posee dos posibles soluciones q_4 y $\pi - q_4$. Sin embargo, la solución definida en el rango $[\pi/2 \quad \pi]$, no es válida por quedar fuera de los límites articulares anatómicos.El rango de esta articulación está definido sobre el intervalo $[-\pi/2 \quad \pi/2]$. Por tanto, la única solución válida se encuentra sobre este intervalo.

Una vez establecido la variable articular q_4, se puede determinar la matriz transformación ${}^{C}T_4$ que según los parámetros DH del Cuadro 1 valdrá:

$${}^{C}T_4 = \begin{bmatrix} -\sin(q_4) & 0 & \cos(q_4) & 0 \\ \cos(q_4) & 0 & \sin(q_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{18}$$

Y por tanto, se puede determinar el sistema de coordenadas 4 sobre el sistema de coordenadas del hombro mediante:

$${}^{H}T_4 = {}^{H}T_C \ {}^{C}T_4 \tag{19}$$

Cuadro 1: Parámetros DH del modelo cinemático simplicado del brazo humano

$\boldsymbol{\theta_i}$	$\boldsymbol{d_i}$	$\boldsymbol{a_i}$	$\boldsymbol{\alpha_i}$
$\pi/2 + q_1$	0	0	$\pi/2$
$3\pi/2 + q_2$	0	0	$\pi/2$
q_3	l_u	0	$-\pi/2$
$\pi/2 + q_4$	0	0	$\pi/2$
$\pi/2 + q_5$	l_f	0	$\pi/2$
$\pi/2 + q_6$	0	0	$\pi/2$
$\pi/2 + q_7$	0	0	$\pi/2$

Con la ayuda de esta matriz de puede obtener la matriz de transformación entre el sistema de la mano y el sistema de coordenadas 4:

$${}^{4}T_M = {}^{H}T_4^{-1} \ {}^{H}T_M \tag{20}$$

La matriz ${}^{4}T_H$ depende de los valores articulares q_5, q_6 y q_7, que forman una articulación esférica y según los parámetros DH del Cuadro 1 y considerando el sistema de coordenadas s_4 desplazado sobre el punto muñeca:

$${}^{i}T_{i+1} = \begin{bmatrix} -\sin(q_{i+1}) & 0 & \cos(q_{i+1}) & 0 \\ \cos(q_{i+1}) & 0 & \sin(q_{i+1}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

sustituyendo para $i = \{4, 5, 6\}$, y aplicando el producto matricial ${}^{4}T_M = {}^{5}T_5 \ {}^{5}T_6 \ {}^{6}T_M$, se obtiene la Ecuación 22.

Considerando la misma forma de la matriz de rotación de la Ecuación 13 se pueden determinar las variables articulares correspondientes a las articulaciones q_5, q_6, q_7 mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} q_5 &= -\text{atan2}\left(n_y, oy\right) \\ q_6 &= \arcsin\left(a_y\right) \\ q_7 &= -\text{atan2}\left(a_x, a_z\right) \end{aligned} \tag{23}$$

Dado el valor articular q_6 se obtiene mediante un arcoseno, su solución no es única, por tanto existe otra solución definida por las siguentes ecuaciones:

$$\begin{aligned} q_5 &= \pi - \text{atan2}\left(n_y, oy\right) \\ q_6 &= \pi - \arcsin\left(a_y\right) \\ q_7 &= \pi - \text{atan2}\left(a_x, a_z\right) \end{aligned} \tag{24}$$

Llegados a este punto se obtiene cuatro soluciones posibles; dos debidas a las soluciones obtenidas para el cálculo de la articulación esférica del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$ {}^{4}T_{h} = \begin{bmatrix} c_5\ c_7 - s_5\ s_6\ s_7 & -c_6\ s_5 & c_5\ s_7 + c_7\ s_5\ s_6 & 0 \\ c_7\ s_5 + c_5\ s_6\ s_7 & c_5\ c_6 & s_5\ s_7 - c_5\ c_7\ s_6 & 0 \\ -c_6\ s_7 & s_6 & c_6\ c_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22) $$

hombro; y otras dos soluciones debidas a la articulación esférica definida por las articulaciones de la muñeca. Por tanto, se obtienen cuatros soluciones que satisfacen las restricciones cinemáticas. Sin embargo, debido a las propiedades anatómicas del brazo humano, los límites articulares están perfectamente definidos, por tanto, se puede establecer que solo una de las cuatro soluciones obtenidas es válida porque el resto, al menos una de las articulaciones está fuera de los límites articulares anatómicos. Esta afirmación se demuestra ya que para cada articulación esférica, sus dos soluciones están definidas en el rango $[0\ \pi]$ o sobre el rango $[0\ -\pi]$. Por tanto, no existe ninguna articulación cuyos límites articulares estén fuera del rango $[-\pi/2\ \pi/2]$.

Según el modelo cinemático simplificado del brazo humano extraído del [7] se define la función necesario para determinar si un vector de coordenadas articulas está dentro del los límites anatómicos del brazo humano. Este procedimiento debe ser aplicado para cada iteración para obtener las variables articulares en cada instante de tiempo.

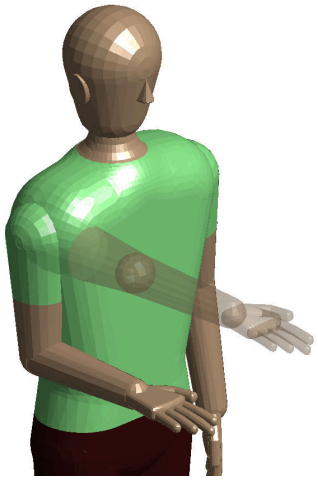


Figura 6: Representación gráfica del interfaz de la actividad durante el ejercicio, donde puede observarse la posición objetivo en modo transparente y la posición en tiempo real del brazo del usuario

5. Experimentación

Se propone realizar una actividad a modo de experimentación con el objetivo de cuantificar errores a la hora de realizar la reconstrucción del modelo. La actividad propuesta consistirá en un ejercicio de simulación, donde se le pedirá al usuario que imite una serie de movimientos especificados por un modelo virtual. Se registraran los valores articulares del brazo del usuario durante todo el ejercicio, para posteriormente compararlos con los valores articulares que se marcan como objetivo en la actividad. Con esto se desea cuantificar cuan precisa es la modelización de un brazo humano realizada con dispositivos IMU.

Como puede observarse en la Figura 6, la interfaz gráfica consta de una visualización a tiempo real de la reconstrucción del brazo del usuario utilizando el método planteado en este articulo, y de una indicación de cual es la posición que debe adoptar el usuario en cada caso (en modo transparente en la Figura 6).

Para esta actividad, el usuario deberá imitar por orden las posiciones definidas en la Figura 7.

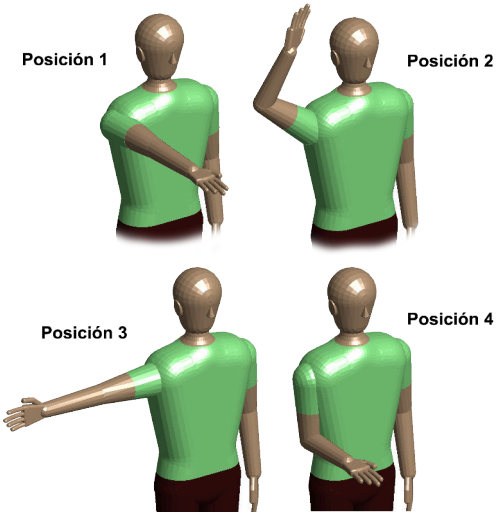


Figura 7: Representación gráfica de las posiciones a imitar por el usuario

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5.1. Resultados

En la Figura 8, se muestran varios resultados de la reconstrucción del brazo por el método presentado en esta artículo. Se puede observar que aunque existe un pequeño error entre la posición calculada y la posición objetivo. Este error es asumible para la realización y valoración de terapias de rehabilitación.

Sin embargo, este método tiene una serie de ventajas. El sistema de reconstrucción es independiente de la actividad a desempeñar. Eso quiere decir que puede servir tanto para monitorizar una tarea como para realizar ejercicios de rehabilitación por si solo. Para ninguna de estas aplicaciones se requiere una gran precisión, ya que el objetivo consistiría en registrar que el ejercicio se realiza correctamente.

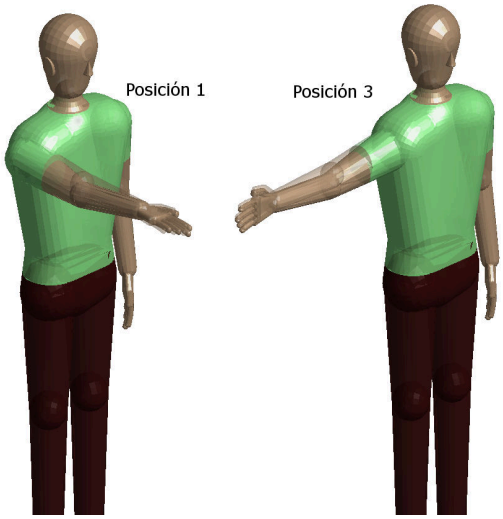


Figura 8: Resultados de la reconstrucción del brazo para la posición 1 y 3.

6. Conclusiones

En este artículo se presenta un método para la reconstrucción cinemática del brazo humano orientado a tareas de neuro-rehabilitación asistida por robots. Para ello, se emplean tres Unidades Inerciales (IMU: Inertial Measurement Unit) como sistemas de referencia independientes colocados en lugares claves del brazo del paciente, para a partir de la dinámica de estos dispositivos, reconstruir el modelo cinemático simplificado de siete Grados de Libertad (GDL) del brazo del paciente. Los resultados obtenidos son prometedores aunque es necesario realizar más pruebas para valorar la exactitud del sistema y repetitibilidad.

Agradecimientos

Este trabajo has sido financiado por el Plan Nacional de I+D+i a través del proyecto "Interpretación de la intención y actuación humana mediante señales biomédicas y el análisis cinemático y dinámico del movimiento" (DPI2011-29660-C04-04).

Referencias

[1] Ju MS., Lin CCK., Chen SM., Hwang IS., Kung PC., Wu ZW., (2007), Applications of Robotics to Assessment and Physical Therapy of Upper Limbs of Stroke Patients, I-Tech Education and Publishing, pp 243-260.

[2] Badesa, F. J., Llinares, A., Morales, R., Garcia-Aracil, N., Sabater, J. M., Perez-Vidal, C. (2014). Pneumatic planar rehabilitation robot for post-stroke patients. Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications, 26(02).

[3] Murphy A., Willen C., and Sunnerhagen KS., (2011), Kinematic variables quantifying upper-extremity performance after stroke during reaching and drinking from a glass, Neurorehabil Neural Repair, Vol. 25, No.1, pp 71-80.

[4] Burgar G., Lum P., Shor P., Van der Loos M., (2000), Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto VA/Stanford experience, Journal of Rehabilitation Research and Development, Vol.37, No.6, pp 663-673.

[5] Madgwick, S.O.H., Vaidyanathan, R., Harrison, A.J.L., (2010), An Efficient Orientation Filter for Inertial Measurement Units (IMUs) and Magnetic Angular Rate and Gravity (MARG) Sensor Arrays.

[6] Mahony RE., Tarek H., Pflimlin JM., (2008), Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.53, No.5, pp 1203-1217.

[7] Lenarcic, J, Umek, A. ,(1994), Simple model of human arm reachable workspace, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, Vol. 24, No.8, pp 1239-1246.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño e implementación de una plataforma experimental para el control de vuelo, gestión y visualización de datos de UAVs

Santiago Sastre Cantón, sansasca@etsii.upv.es, José Luis Racero Robles, josrarob@etsid.upv.es
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universitat Politècnica de València.
Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó, {alvig2, sergarro, jpico}@upv.es
Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen

En el presente proyecto se ha diseñado un sistema con el que se puede gestionar el vuelo de un ARdrone. El sistema en sí se encarga de transformar un juego cerrado que únicamente funciona con aplicaciones en teléfonos móviles en una plataforma para docencia e investigación sobre la que probar algoritmos de control programados por el usuario, convirtiéndolo así en vehículo aéreo no tripulado capaz de seguir trayectorias trazadas por el usuario de forma completamente autónoma.

Por tanto, el proyecto podrá ser utilizado como plataforma experimental para que investigadores puedan probar nuevos algoritmos de control diseñados por ellos mismos, así como plataforma docente donde el alumno entienda la aplicación de la teoría de control aprendida en clase de forma práctica, observar los efectos de modificar parámetros de un mismo controlador y estudiar el efecto de diferentes controladores sobre un sistema dinámico real, estable y divertido.

1. Introducción

El ARdrone es un pequeño cuadricóptero fabricado por Parrot S.A. diseñado para los aficionados al vuelo teledirigido. No obstante, su única función es ser dirigido por un usuario con instrucciones sencillas, no tiene capacidad para seguir trayectorias de forma autónoma.

Figura 1: ARdrone.

El objetivo es convertir este objeto de ocio en una plataforma científica experimental con la que poder aplicar diferentes algoritmos de control diseñados. El usuario podrá a partir de ahora escribir el código de su controlador en lenguaje C de forma sencilla en una ventana habilitada para ello y monitorizar su funcionamiento, viendo en gráficas dibujadas online la ruta que sigue el drone, la respuesta ante escalón y las acciones de control calculadas.

La plataforma está compuesta básicamente de dos partes generales: Una es un código en lenguaje C compilado para procesadores ARM9 (procesador que hace funcionar el ARdrone) que se ejecuta en el drone, la otra es una aplicación programada en labview que se ejecuta en un PC.

Para el correcto funcionamiento de todas las partes fue necesario diseñar un protocolo de comunicación basado en el envío de cadenas de caracteres vía UDP a través de un router.

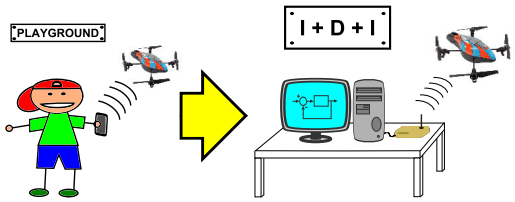


Figura 2: *El objetivo del proyecto es convertir un objeto de ocio en una plataforma experimental para investigación y docencia.*

NOTA: Para que el sistema funcione se deberá configurar un router con el nombre UAVROUTER, dirección IP 192.168.10.1 y máscara de subred 255.255.255.0.

2. Aplicación del drone

La aplicación que se ejecuta en el drone está diseñada para dar autonomía al drone. Es decir, al implementarse el controlador en ella, únicamente recibirá la referencia desde el ordenador en forma de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

coordenada a la que debe llegar, y él, por sí mismo se gestionará para llegar a ella. No habrá necesidad de que está contínuamente recibiendo acciones de control. Está programada en lenguaje C y compilada para procesadores ARM utilizando el "Cross GCC compiler". A esto, se ha añadido la creación de un archivo .txt en el que se creará una tabla con todos valores durante todo el tiempo de ejecución de acciones de control, referencias y salidas entre otros, para su posible importación y análisis con otros softwares de cálculo como puede ser Matlab.

Su estructura básica es la siguiente:

- Asignación de dirección IP al ARdrone llamando a la librería DroneIP.h (apartado 3.3), y creación en consecuencia de unos puertos de lectura y escritura a partir de dicha IP según la nomenclatura utilizada, ver tablas 1 y 2
- Declaración de variables.
- Creación del archivo .txt
- Lectura de la configuración que el usuario desea, enviada por labview.
- Envío de dicha configuración al ARdrone.
- Comienzo del bucle de ejecución:
  - Envío de la señal de Watchdog para evitar el bloqueo de los puertos de comunicación por parte del ARdrone (por protocolos internos explicados en [2]).
  - Lectura de Navdata (ver apartado 2.1).
  - Selección de los datos que nos son de utilidad.
  - Creación del paquete de datos que enviaremos al PC.
  - Escritura en el archivo .txt de todos los valores necesarios.
  - Envío del paquete de datos al PC, sólo cada 5 iteraciones. Ver sección 2.3
  - Lectura de puerto UDP en busca de instrucciones enviadas por el PC. Si la instrucción es exit, se romperá el bucle de ejecución.
  - Según la instrucción leída se le enviará un comando u otro al ARdrone, y si la instrucción es volar entrará en ejecución el controlador que hayamos diseñado.
  - Lectura del tiempo de ejecución de la presente iteración. Si es menor que 60 milisegundos se detendrá el bucle el tiempo restante. Esto se hace para temporizar las iteraciones ver sección 2.3.
- Envío al PC de la cadena "BYE".
- Cierre de los puertos.
- Fin del programa.

Drone	IP
1	192.168.10.61
2	192.168.10.62
3	192.168.10.63
.	.
.	.
.	.
9	192.168.10.69

Tabla 1: *Nomenclatura utilizada en la creación de las direcciones IP.*

IP del Drone	Puerto de lectura	Puerto de escritura
192.168.10.65	7775	6665
192.168.10.66	7776	6666
192.168.10.67	7777	6667

Tabla 2: *Nomenclatura utilizada en la creación de los puertos UDP a partir de la dirección IP del drone.*

Éste programa estará incluída en el hilo de ejecución del propio ARdrone. Es decir, al disponer de un único procesador el ARdrone solamente es capaz de procesar las instrucciones una a una como cualquier máquina secuencial. Esto le obliga a ejecutar nuestra aplicación, y después llevar a cabo todas las instrucciones internas, que desconocemos, para su control interno y configuración propia. En la Figura 3 podemos observar las instrucciones que sigue y el orden estimado en que las ejecuta.

2.1. Navdata

El ARdrone, en su fase de adquisición de datos, lee la información de los sensores instrumentados en su IMU (Unidad de Medida Inercial). Internamente los procesa, crea y envía un paquete de datos en el que están todas estas medidas numéricas además de información sobre el estado del drone. A este paquete se le dio el nombre de Navdata como abraviatura de Navigation Data.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En el paquete que Parrot envía, solo hay un pequeño porcentaje de información que nos resulta de utilidad. Por ello, hemos añadido una parte en esta aplicación en la que seleccionamos los datos que queremos y los enviamos al PC, adaptando el formato al protocolo de comunicación que usamos. Navdata se mantendrá como el nombre del nuevo paquete.

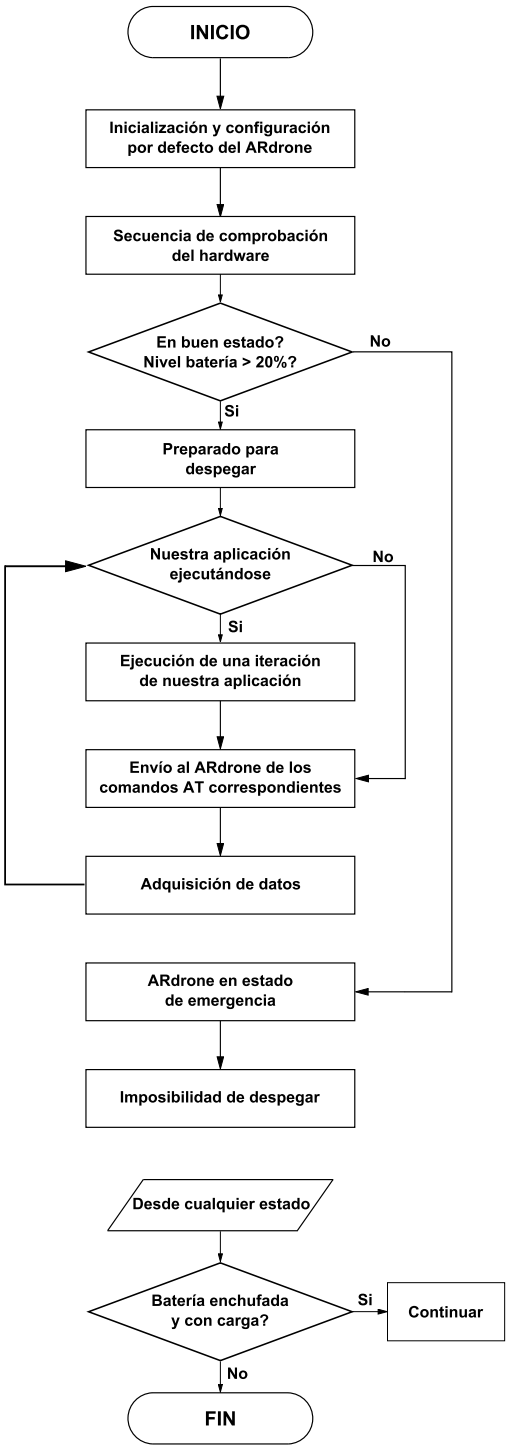


Figura 3: *Hilo de ejecución del ARdrone en el que se ha incluído nuestra aplicación.*

Para la correcta identificación por parte del PC de los datos contenidos en el nuevo Navdata se le añade una cabecera y una cola. Esto le permitirá localizar el comienzo y fin del paquete para posteriores operaciones.

2.2. Controlador

El usuario podrá escribir su código de control en lenguaje C en una ventana habilitada para ello que se puede ver en la sección 3.3, compilarlo y cargarlo en el drone. Para que el controlador pueda ser modificado sin modificar todo el código las acciones de control serán calculadas llamando a la función Controller.c. Éste será el único trozo de código al que el usuario tendrá acceso desde la aplicación del PC, evitando así errores.

Como argumento, ésta recibe información suficiente como para implementar casi cualquier controlador. Estos son períodos de muestreo, referencias, referencias en la iteración anterior y acciones de control de la iteración anterior.

El usuario deberá tener en cuenta que el controlador que diseñe debe estar discretizado a 60 milisegundos. Este es el período al se ejecutará cada iteración.

2.3. Temporización

La aplicación que se ejecuta en el UAV, se ha diseñado para hacerlo cada 60 milisegundos. Esto es porque el ARdrone tiene un protocolo de comunicación ya implementado, y hay que cumplir unos requisitos para no tener problemas. El más importante de estos es que se debe enviar alguna instrucción cada 60 ms creando un flujo de datos constante. Si esto no se cumple, el ARdrone considerará que se ha perdido, bloqueará los puertos de comunicación y aplicará sus protocolos de seguridad. Si no hay órdenes que mandarle, se le enviará una señal de watchdog.

Como el drone tiene el controlador implementado en su interior, y con nuestra aplicación ahora es autónomo, no necesita estar recibiendo instrucciones contínuamente. Lo único que necesita es recibir referencias, instrucciones de despegue, aterrizaje y reseteo. La frecuencia con la que se lea los puertos no necesitará por tanto ser tan alta. Por ello, se deci-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dió bajar el período de envío de Navdata al PC a 300 milisegundos. Se reducirá así la carga computacional tanto al drone como al PC, se evitará sobrecargar los puertos de comunicación con paquetes de datos innecesarios y haremos así que todo funcione de manera mucho más fluída.

Al ser el período de envío 300 ms solo se enviará datos cada 5 iteraciones de la aplicación, enviando los últimos datos leídos.

2.4. Traductor

Nuestra aplicación se comportará también como un traductor de instrucciones entre el ARdrone y el PC. El cuadricóptero solo funciona si se le envían unas instrucciones determinadas llamadas comandos AT. Si nosotros deseamos por ejemplo que aterrice, desde el PC recibiremos la cadena de caracteres "land", y habrá que transformarla en un comando AT para que el sistema haga lo que deseamos.

Para más información sobre lo leído, consúltese la guía del desarrollador (Developer's Guide) del ARdrone 1.0 de Parrot S.A. [2].

3. Aplicación del PC

El programa que se ejecuta en el PC ha sido realizado en Labview y se basa en [1]. Su facilidad de uso y su eficiencia lo hacían el software óptimo para nuestro propósito.

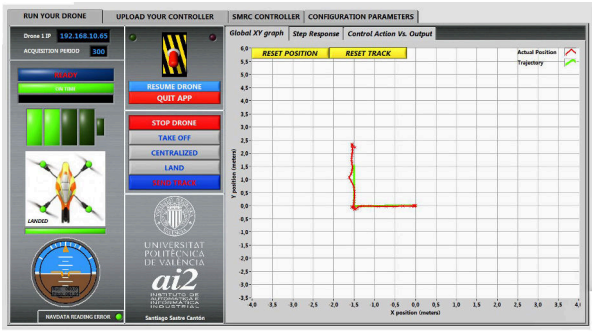


Figura 4: *Pestaña de control del drone de la interfaz de usuario.*

Con el se podrá manejar el drone haciendo uso de los controles, visualizar los datos de vuelo o Navdata de forma gráfica, compilar el código de control que se desee, cambiar ciertos parámetros de vuelo del cuadricóptero y preparar un ARdrone recién comprado con la configuración de fábrica para funcionar con nuestra plataforma. Todo ello ha sido diseñado para ser de uso fácil e intuitivo. La interfaz de usuario dispone de controles etiquetados y señales visuales para poder observar en todo momento qué está pasando o qué errores se están comentiendo. Ha sido dividida en pestañas, cada una con una etiqueta para la rápida localización de funciones.

Su funcionamiento es secuencial, realizando primero una adquisición de datos, envío de instrucciones después, y mostrar los datos leídos por pantalla a continuación. El qué instrucción enviar o no se indicado por una máquina de estados y unos controles.

3.1. Manejo del drone

Para el uso de la aplicación, se han puesto a disposición del usuario una serie de botones y pulsadores cada uno con un propósito específico. En la figura 4 se puede ver la parte de la interfaz de usuario encargada de la gestión del vuelo que contiene estos controles. Se ha incluído también en esta parte un plano en el que se podrá generar la ruta que queremos que el drone siga. Para hacerlo, únicamente habrá que pinchar con el ratón encima del plano los puntos por los que queremos que pase o "waypoints" y automáticamente se unirán con una recta generándose así la ruta.

En la fase de adquisición de datos leerá el paquete enviado por la aplicación de drone, Navdata, por protocolo UDP como se ha dicho anteriormente. Para evitar problemas de lecturas incompletas de paquetes, se realiza una detección de si el paquete está incompleto y se concatenará con el próximo que se leerá en la siguiente iteración.

A continuación se describen la función de los botones que se ven en la figura anteriormente mencionada.

- START DRONE: inicia la comunicación y deja al drone en estado de espera de instrucciones.
- TAKE OFF: Despegar.
- LAND: aterrizar.
- SEND TRACK: enviar ruta a seguir. El drone entra en modo de vuelo autónomo, y se ejecuta el código de control que el usuario haya compilado.
- EMERGENCIA: Aterriza el drone esté como esté.
- QUIT APP: Finaliza las aplicaciones tanto del PC como la del drone.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- RESUME DRONE: Resetea los valores de las variables internas de la aplicación del drone.
- RESET POSITION: Resetea la posición del drone, y el punto en el que se encuentra pasará a ser el orígen de coordenadas.
- RESET TRACK: Resetea la ruta que hemos creado para que el drone la siga, dándonos la opción de crear una nueva.

3.2. Visualización de datos

La aplicación cuenta con una serie de indicadores para monitorizar el estado del drone, el estado de la aplicación, trayectorias seguidas en vuelo y la efectividad del controlador que se haya diseñado.

3.2.1. Estado del drone

Se dispone de un horizonte artificial que nos muestra la inclinación del drone, y de los cuatro mismos leds que tiene el ARdrone para indicar su estado:

- Los 4 en verde: Comunicación establecida. Drone aterrizado pero listo para volar.
- Delanteros verde, traseros rojo: drone en estado Hovering o volando de forma autónoma.
- Los 4 en rojo: drone en estado de emergencia. Ocurre si en la secuencia de comprobación de hardware se detectan partes dañadas y cuando hay colisión o accidente.
- Los 4 apagados: Drone no conectado con el PC.

Se incluyó también un led indicador de emergencia para resaltar el efecto visual de un accidente en la aplicación.

3.2.2. Estado de la aplicación

Existe también un indicador que nos informa de en qué estado se encuentra la máquina de estados. También se mostrará por pantalla el string enviado a la aplicación del drone y se avisará de si el bucle de adquisición de datos y envío de instrucciones no acaba en los 300 milisegundos estipulados.

Se puso también un led llamado NAVDATA READING ERROR que avisa al usuario de que hay problemas en la recepción de Navdata. Esto puede ocurrir por complicaciones con el drone, el PC o el router que los une.

3.2.3. Vuelo

Se han incluído una serie de gráficas para visualizar los datos de vuelo del drone. Éstas son las tradicionales gráficas que resultan útiles para el análisis de la efectividad y el error de un controlador.

En la misma en la que se crea la ruta de referencia podremos ver la ruta real que el drone ha seguido, pudiendo analizar así cómo y cuánto se ha desviado. Se añadió también una respuesta ante escalón en ambos ejes (X e Y) y una en la que se ve la acción de control ante la salida del drone. Éstas dos sólo recopilarán datos durante el vuelo, ya que en otros momentos resulta inútil porque el controlador no está en funcionamiento.

En la figura 4 se puede ver la ventana donde se dibuja gráfica de ruta, y las pestañas para mostrar las otras dos.

3.3. Compilador

En la figura 5 se observa que hay dos ventanas para escribir código. Una es para el controlador de roll (alabeo) y la otra para el de pitch (cabeceo). Se debe tener en cuenta que para avanzar en el eje X la acción de control deberá ser positiva y en el Y negativa. Esto fuerza al usuario a diseñar dos controladores para un sistema que por otro lado está desacoplado. Además, haciéndolo de esta manera, damos al usuario la opción de optimizar sus controladores pudiendo asignarles diferenctes ganancias para el cálculo de las dos acciones de control. Con el objetivo de facilitar la implementación en código de los reguladores, se han añadido unas etiquetas en la que se indica la estructura que tiene la función Controller.c y los argumentos que recibe.

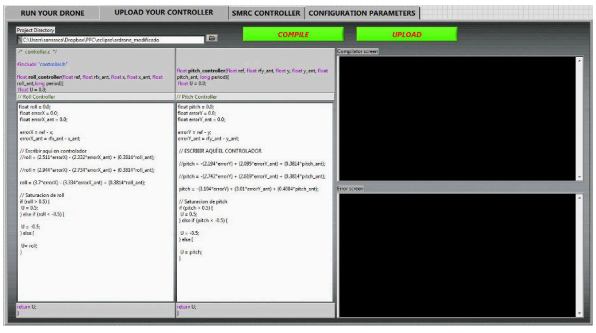


Figura 5: *Pestaña para escribir, compilar y subir el controlador al drone.*

Para poder asignarle al drone la dirección IP que hayamos puesto en Drone 1 IP de la figura 4, en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

el proceso de compilado se modificará también la librería DroneIP.h, encargada de asignarle la IP y los puertos de comunicación al ARdrone. Adquiere este dato de donde escribimos la dirección en la interfaz del usuario.

Como en la escritura de código en C es difícil no cometer errores sintácticos se decidió incluír dos ventanas adicionales. En una de ellas se indicará cuál es el error (falta de un punto y coma, llaves no cerradas, etc.) y en la otra se mostrará las instrucciones que el compilador ha llevado a cabo, ambas en modo de consola.

Para compilar el código se facilita un botón "COMPILE" y este mismo será el indicador de que el sistema está ocupado creando el objeto parpadeando y mostrando el mensaje "compiling" al usuario.

Para subir el binario creado en el compilado al drone se programó un botón "UPLOAD" que por protocolo FTP lo carga. Una vez pulsado se comportará como indicador del mismo modo que el botón "COMPILE" mostrando el mensaje "uploading".

3.4. Configuración de un ARdrone nuevo

El ARdrone de Parrot S.A. está diseñado para crear una red inalámbrica y que el dispositivo móvil con que se vaya a controlar se contecte a ella. Pero al ser esto una plataforma concebida para funcionar con un router propio, habrá que cambiar esa configuración interna. Necesitará no crear sino conectarse a una red ya creada (modo managed en lugar de AD-Hoc). Cómo hacer esto se puede ver en [3]

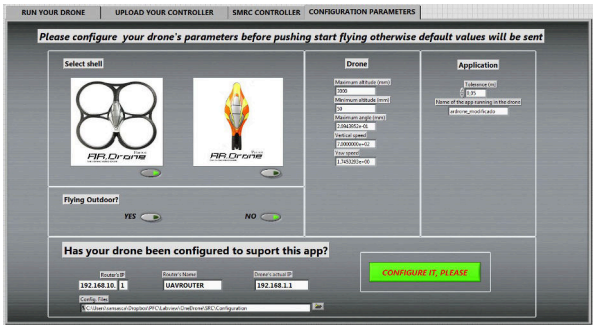


Figura 6: *Pestaña de configuración de los parámetros de vuelo desde donde también se puede modificar la configuración de fábrica del ARdrone para su compatibilidad con la presente plataforma.*

Por ser este un proceso laborioso y que require conocimientos extensos del funcionamiento interno del ARdrone, se implementó un configurador para facilitar el proceso al usuario. Ya no tendrá que estudiar la guía del desarrollador [2]. Únicamente habrá que conectarse a la red que el cuadricóptero crea y presionar el botón "CONFIGURE IT, PLEASE" (figura 6) y el proceso de configuración se llevará a cabo automáticamente. Después, conectarse a nuestro router y todo funcionará normalmente.

4. Resultados

Para la exposición de los resultados se implementó un controlador PD (Ver figura 7) y adicionalmente un controlador SMRC (Sliding Mode Reference Conditioning) [4] para poner a prueba a eficiencia de la plataforma. El SMRC basicamente, es un algoritmo de anti-*windup*, pero mas general y capaz de tranajar con restricciones distintas a la accion de control a la entrada de la planta.

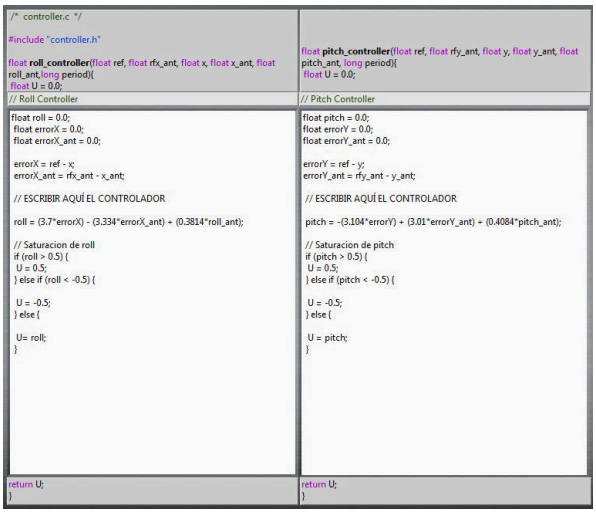


Figura 7: *Código en C del regulador diseñado.*

En la figura 8 se puede observar que el controlador implementado hace que el drone siga casi a la perfección la ruta que se le envía. La desviación que se aprecia a la derecha es debida a que el drone ya ha llegado al último waypoint y se ha quedado en estado hovering, desviándose por motivos ajenos al controlador.

Si se observa la figura 10 podrán apreciarse las respuestas ante escalón en el eje x (arriba) y en el eje y (abajo). Se ve que la referencia de posición es el punto (1,0) por la posición de las líneas amarillas (también en la figura 8). Luego, puede observarse que hay una línea verde que tiende a la referencia y una línea roja que la sigue. La línea verde es la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 8: *Posición real del drone (rojo) contra la ruta referencia que se le envía (blanco).*

salida del controlador SMRC, y su funcionamiento puede entenderse si se lee [4, 5]. La salida del controlador SMRC es una referencia acondicionada capaz de ser seguida por el controlador, y es la referencia que se introduce al bucle de control, siendo la referencia que el PD debe seguir. Para su comprensión se adjunta también el diagrama de bloques del sistema al completo, figura 9.

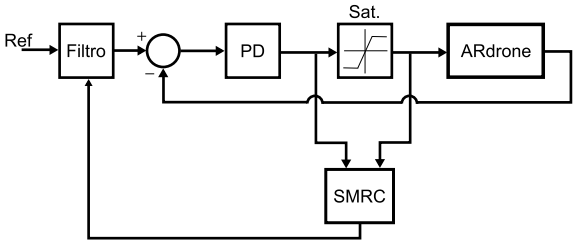


Figura 9: *Diagrama de bloques del sistema al completo.*

Como resultado adicional, también se puede acceder desde la pestaña *Control Action* (ver figura 11) a la señal de la accion de control del ARdrone.

Finalmente, luego de realizar un experimento, se pueden exportar todos los valores medidos (con tiempo de muestreo 60ms) que han sido guardados en la memoria del quadricoptero e importar desde cualquier software, por ejemplo Matlab, para su posterior analisis.

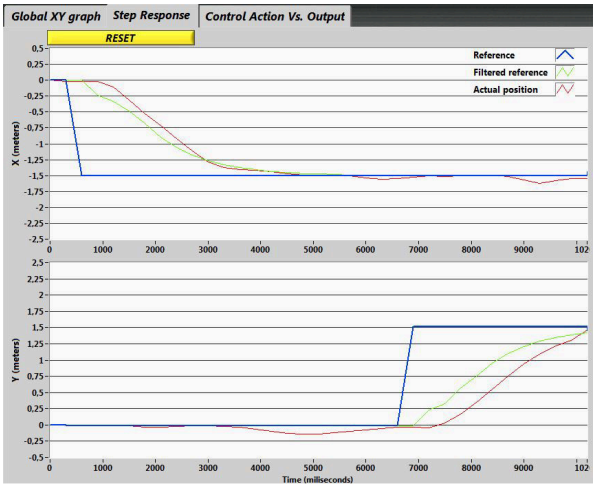


Figura 10: *Respuesta ante escalón del sistema. Referencia en azul, referencia acondicionada salida del regulador SMRC en verde y salida del sistema en rojo.*

5. Conclusiones

La plataforma diseñada supone un avance a la hora de prueba de algoritmos de control. Se ha gestionado el funcionamiento interno del ARdrone, ayudando al usuario final, y apartandolo de tener que aprender la gestion a bajo nivel. Esto le permitirá tener un sistema sobre el que probar sus algoritmos de control y observar si son operativos y optimizables de una manera muy sencilla y tradicional, siendo el uso muy intuitivo, todo esto solo teniendo que preocuparse de la implementación se sus algoritmos y no de la gestion del quadricoptero.

Además, se ha conseguido para profesores y alumnos una plataforma para usar en prácticas de asignaturas de control, alejándonos de los tradicionales motores de corriente continua y hornos de resistencias, ofreciendo otra perspectiva de lo que la teoría de control puede ofrecer y de como llevarlo a la practica.

Asimismo se está trabajando en una plataforma ampliada, para la gestion de algoritmos de mas alto nivel para coordinacion y control de formación de UAVs, para lo cual el presente trabajo ha sido un punto de partida.

Agradecimientos

Este trabajo es apoyado parcialmente por el Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España a través de los proyectos FEDER-CYCIT DPI2011-28112-C04-01 y TIN2011-28082.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

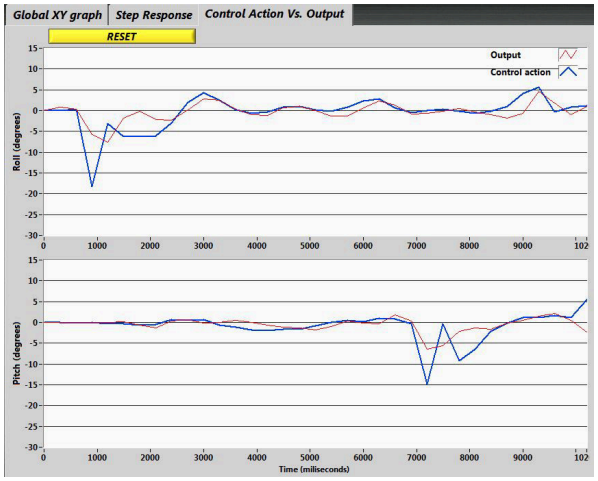


Figura 11: *Acción de control calculada por nuestro controlador, figura 7, en amarillo contra salida real de la inclinación del drone en rojo.*

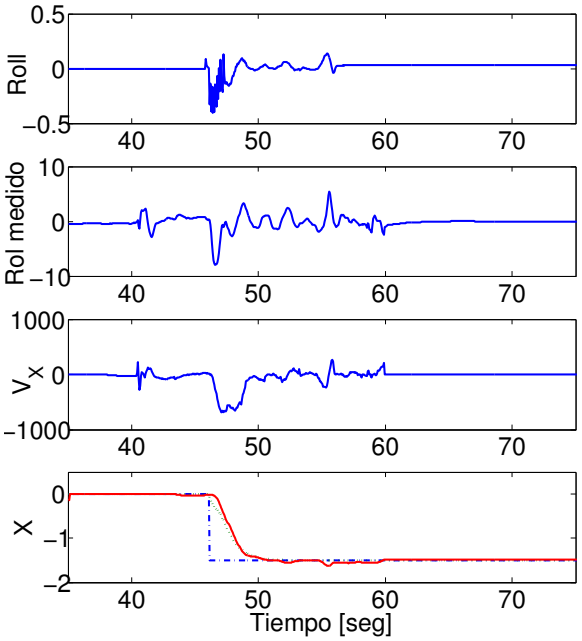


Figura 12: Gráfica con los valores de roll pasados a matlab.

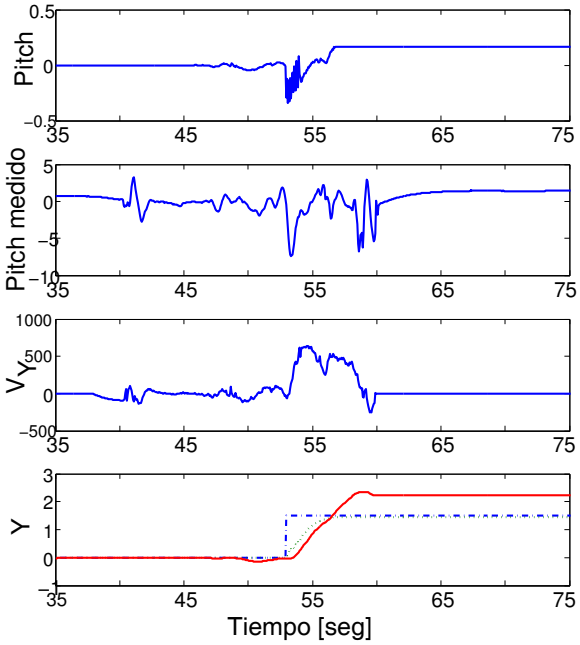


Figura 13: Gráfica con los valores de pitch pasados a matlab.

Referencias

[1] S García-Nieto, X Blasco, J Sanchís, J M Herrero, G Reynoso-Meza, and M Martínez-Iranzo. Trackdrone lite, 2012-07-05 2012.

[2] Stephane Piskorksi and Nicolas Brulez. *AR.Drone Developer Guide.* Parrot, revision sdk 1.6 edition, February 2011.

[3] Ignacio Ribelles, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, and Jesús Picó. Diseño e implementación en uavs de un sistema de control de formación de vuelo basado en smrc. In *Actas de las XXXIV Jornadas de Automática*, pages 466–473, 2013.

[4] Alejandro Vignoni, Fabricio Garelli, and Jesús Picó. Coordinación de sistemas con diferentes dinámicas utilizando conceptos de invarianza geométrica y modos deslizantes. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(4):390–401, 2013.

[5] Alejandro Vignoni, Fabricio Garelli, and Jesús Picó. Sliding mode reference coordination of constrained feedback systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Configuración y ejecución de benchmarks de intervención robótica submarina en UWSim mediante herramientas Web

Javier Pérez, Jorge Sales, Raúl Marín, Enric Cervera and Pedro J. Sanz
Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores
Av. Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana (España)
Universitat Jaume I
{japerez, salesj, rmarin, ecervera, sanzp}@uji.es

Resumen

La realización de benchmarks es hoy en día un problema a abordar en plataformas robóticas de investigación, debido al hecho de que no es fácil reproducir experimentos previos y conocer en detalle en qué condiciones reales se han ejecutado otros algoritmos. Contar con una herramienta basada en web para configurar y ejecutar benchmarks abre la puerta a nuevas oportunidades como el diseño de tele-laboratorios virtuales que permitan el desarrollo de nuevos algoritmos utilizando restricciones específicas y detalladas. En el contexto de las intervenciones submarinas con robots semi-autónomos, la situación resulta todavía más interesante. Para este escenario en particular, se propone el uso de una herramienta de simulación y benchmarking de código abierto, con la posibilidad de ser configurada y utilizada desde una interfaz web, permitiendo la descarga de los resultados para su posterior análisis.

Palabras clave: Benchmarking, Intervención Submarina, Datasets, Simulador Open Source, Simulador on-line.

1. Introducción

La manipulación submarina mediante I-AUVs (Autonomous Underwater Vehicles for Intervention) permite el diseño de nuevas aplicaciones como la estudiada en el proyecto FP7 TRIDENT [1], donde se recuperó una caja negra del fondo del mar de forma autónoma. Para lograr esto, el uso de UWSim (Underwater Simulator [2]) ha sido fundamental para poder realizar pruebas, integración y también benchmarking (véase Fig. 1).

Existen otros simuladores previos para aplicaciones submarinas, que o bien han quedado obsoletos o están siendo utilizados para fines muy específicos [3] [4]. Por otra parte, la mayoría de los simuladores disponibles no han sido diseñados como código abierto, lo que hace difícil mejorar y potenciar las capacidades del simulador. Además, hay otros simuladores comerciales como ROVSim [5], DeepWorks [6] o ROVolution [7]. Sin embargo, éstos han sido diseñados para entrenar a pilotos de ROV, que no es el objetivo de nuestra línea de investigación.

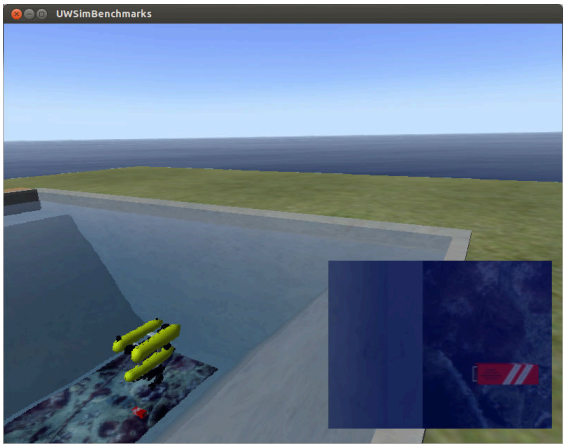


Figura 1: *Benchmark* de *tracker* visual ante cambios en las condiciones de visibilidad de la escena.

La definición de *benchmarks* específicos para intervenciones submarinas en simuladores, permite tener una plataforma perfecta para comparar en igualdad de condiciones el rendimiento de dos algoritmos diferentes. Se han propuesto varias definiciones de *benchmarks*, pero en este artículo vamos a utilizar la propuesta en [8], en el sentido de que "incluye evaluación numérica de los resultados (métricas de rendimiento) como un elemento clave", y también que "los aspectos principales son la repetibilidad, la independencia, y la no ambigüedad".

Algunos trabajos previos sobre *benchmarking* se han realizado utilizando otros simuladores, como Stage [9], USARSim [10] o Webots [11]. Sin embargo, este trabajo describe tanto el desarrollo de *benchmarks* específicos, como una plataforma *online* para la configuración y ejecución de *benchmarks* de forma remota. Por otra parte, y hasta donde los autores tenemos conocimiento, en el contexto de la robótica submarina no se ha propuesto ningun trabajo de este tipo hasta la fecha.

En este artículo se presenta una plataforma para el diseño de *benchmarks* configurables haciendo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

uso del simulador UWSim y se aporta un ejemplo de comparación de *trackers* visuales. En particular, se describe la infraestructura desarrollada que permite el uso de esta herramienta tanto de manera local [12], como *on-line*, utilizando una herramienta de configuración web [13].

2. Revisión de *suites* de *benchmarking* y *toolkits* relacionados

En los últimos años, se han desarrollado varias suites de *benchmarking* en el campo de la robótica. Muchas de ellas se centran exclusivamente en un subcampo específico de investigación robótica, pero, hasta donde los autores tenemos conocimiento, ninguna de ellas se centra en el campo de los vehículos submarinos autónomos.

En el campo de la manipulación robótica, se han presentado varias suites tales como el *OpenGrasp Benchmarking Suite* [14]. Esta suite es un entorno de software para la evaluación comparativa de agarre y manipulación diestra usando el toolkit OpenGrasp. También proporciona un servicio web que administra los escenarios, *benchmarks* disponibles, modelos y resultados de benchmarks. La desventaja es que el software a evaluar ha de ser adaptado.

Otra suite interesante de *benchmarking* en el campo de la manipulación es VisGrab [15]. VisGrab es un *benchmark* para la manipulación basada en visión. Esta suite ofrece un software capaz de evaluar métodos de generación de agarres basados en visión. En este caso, el sitio web sólo proporciona la publicación de los resultados.

Planificadores de movimiento, seguimiento y planificación de trayectorias han sido también campos de investigación muy activos en lo que respecta a métricas y suites de *benchmarking*. En [16], los autores describen una infraestructura genérica para hacer *benchmarking* de planificadores de movimiento. El punto clave de la contribución es la facilidad para comparar diferentes diseños debido al uso integrado de ROS (Robot Operating System) [17] y MoveIt!.

3. UWSim: una herramienta de simulación 3D para *benchmarking*

UWSim[1] [2] es una herramienta de software de código abierto para la visualización y la simulación de misiones robóticas submarinas y que permite conectarse con un módulo de *benchmarking* (ver Figs. 2 y 1). El software es capaz de visualizar escenarios virtuales bajo el agua que se pueden configurar utilizando software de modelado estándar y se puede conectar a programas de control externo mediante el uso de interfaces de ROS.

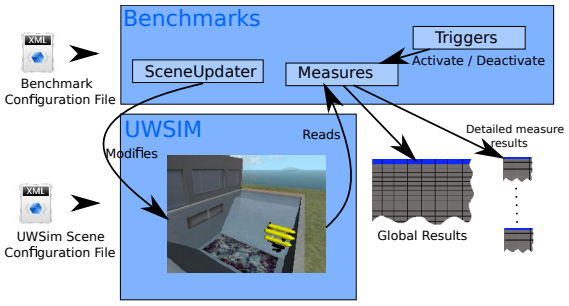


Figura 2: Diagrama de flujo del módulo de *benchmarking*: la configuración del *benchmark* se carga en el módulo y la escena en el simulador UWSim. A continuación, el sistema produce resultados que se guardan para un posterior análisis.

UWSim se está utilizando actualmente en diferentes proyectos financiados por la Comisión Europea (MORPH [18] y PANDORA [19]) con el fin de realizar *HIL (Hardware In the Loop)* y experimentos para reproducir misiones reales a partir de los registros o *logs* capturados durante la ejecución de las mismas.

Recientemente, se ha desarrollado un módulo de *benchmarking* para UWSim [20]. Al igual que UWSim, este módulo utiliza ROS para interactuar con otro software externo. La interfaz de ROS permite que se pueda evaluar un programa externo y que pueda comunicarse tanto con el simulador (que puede enviar comandos para llevar a cabo una tarea) como con el módulo de *benchmarking* (que puede enviar los resultados o los datos necesarios para ser evaluado). La información detallada sobre cómo configurar y ejecutar un *benchmark* en UWSim se puede encontrar en [12].

4. La ejecución de benchmarks online

4.1. El servidor de configuración y visualización web

El sistema de ejecución de benchmarks es el que se muestra en la Fig. 3. El servidor online *(robotprogramming.uji.es)* atiende las peticiones web y sirve las páginas. Además, hace de intermediario con el servidor de simulación *(arkadia.act.uji.es)*, el cual es inaccesible desde el exterior (ya que pertenece a la red de servidores internos del dominio *uji.es* y está protegido por un *firewall*), redirigien-

[1] Disponible online: http://www.irs.uji.es/uwsim

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

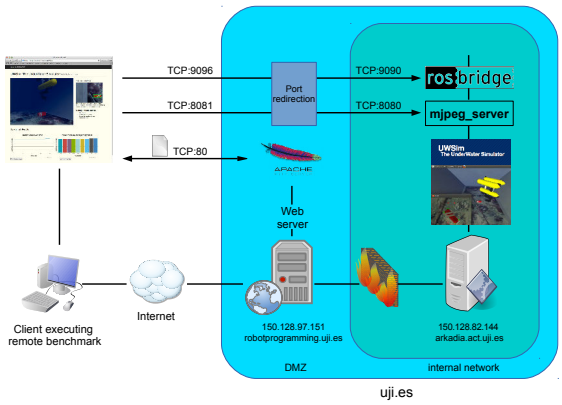


Figura 3: Diagrama de interacción del servicio web de configuración y ejecución de benchmarks.

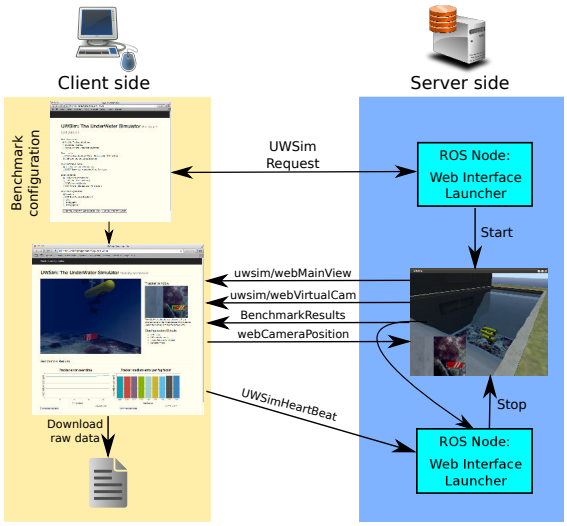


Figura 4: Diagrama de red del servicio web de configuración y ejecución de benchmarks.

do las llamadas de `rosbridge` y `mjpeg_server` a él. De forma que la interacción con el servidor de simulación es transparente para el cliente, el cual únicamente hace llamadas a través de la interfaz de JavaScript para `rosbridge` y recibe streaming de video mediante `mjpeg_server`.

4.2. El servicio de ejecución de benchmarks

El funcionamiento del servicio de ejecución web es el que se puede ver en la Fig. 4. En primer lugar, el usuario selecciona las opciones de configuración deseadas a través de un formulario que permite escoger entre diferentes benchmarks, y algoritmos a evaluar. Aunque de momento solo está activo el benchmark de visibilidad, ya está preparado para ejecutar benchmarks de corrientes y reconocimientos de patrones y en un futuro se podrá incluso proporcionar el código fuente a evaluar y publicar y compararse con aquellos que lo deseen.

Una vez el usuario ha configurado las opciones deseadas, se pasa a ejecutar el benchmark online. Para ello se llama al servicio `/uwsimRequest` utilizando `rosbridge`, el cual es un mensaje que contiene un diccionario de claves y valores en forma de dos vectores. En ellos se transmiten las opciones de configuración seleccionadas por el usuario al nodo de ROS `webInterfaceLauncher` situado en el servidor de simulación que se encarga de ejecutar la petición.

Para mantener igualdad de condiciones a la hora de comparar los resultados de distintos *benchmarks*, es necesario asegurar que los benchmarks se ejecuten de manera individual, ya que es posible que los resultados se vean afectados por los recursos disponibles en el momento de la simulación. Es por esto que el nodo de ROS que recibe la llamada al servicio `uwsimRequest` solo permite la ejecución de una instancia del simulador de manera simultánea. Esto se consigue utilizando un *Id* de cliente generado aleatoriamente en el servidor en el momento de la petición, y que servirá para identificar al cliente a lo largo de la simulación. En el caso de accesos simultaneos se muestra un mensaje para indicar que el servidor está ocupado, en el caso de que el servicio web se extienda se podría crear una cola de clientes con un tiempo de espera estimado. Además de este identificador, que permite conocer cuando llega un nuevo cliente, se necesita conocer cuando un cliente ha abandonado el servicio y cuando ha terminado la ejecución de un cliente.

Para ello se emplean dos métodos: un *heartbeat* asociado al cliente y monitorización de la ejecución. Para el *heartbeat* se utiliza un topic `webUWSimHeartBeat` que envía el cliente JavaScript cada segundo con su *Id* de cliente. De esta forma, el servidor de simulación es capaz de detectar una desconexión o una caída del cliente y abortar la simulación para permitir el acceso a otro cliente. En el caso de que la comunicación sea muy lenta y no sea capaz de enviar al menos 1 *heartbeat* cada 10 segundos el proceso de simulación se abortará igualmente. Para estos casos se están estudiando alternativas que permitan la simulación sin presencia del cliente y el envio de resultados mediante otro medio, como puede ser correo electrónico.

La monitorización de la ejecución se hace a través del envío de resultados, en el momento que se detecta que no se están enviando resultados al cliente durante un tiempo establecido se decide que el experimento ha finalizado, independientemente del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

estado en el que haya terminado.

Una vez el *webInterfaceLauncher* ha establecido que el experimento ha terminado, manda una señal de terminación *(SIGINT)* al proceso de simulación y deja libre el *slot* para futuros clientes. Además de esto queda como trabajo futuro añadir la funcionalidad de acelerar las simulaciones para aumentar la utilidad del servicio dando la posibilidad de realizar benchmarks en lotes.

Durante la ejecución de la simulación, se puede observar una pantalla principal con la vista principal del simulador en 3D recibida a través de un topic de imagen mediante `mjpeg_server` (ver Fig. 6). En esta vista, el cliente puede moverse por la escena utilizando el ratón a modo de `trackball`, el botón derecho para desplazarse y la rueda del ratón para hacer zoom. Estas órdenes se codifican en JavaScript para enviar en el topic `webCameraPosition` la nueva posición de la cámara al servidor, el cuál actualizará la imagen.

Para la visualización de resultados por parte del cliente se utiliza el topic `BenchmarkResults` publicado por el módulo de benchmarks [20], el cual envía los resultados conforme se van generando. Este topic es capturado a través de `rosbridge` por el JavaScript del cliente y los resultados se representan de forma gráfica y en tiempo real mediante la librería `canvasJS`. Además, existe la posibilidad de descargar los datos en formato de texto para posterior análisis. Para ello, existe un botón en la interfaz de usuario con la leyenda *"Download raw data"*. Aunque la simulación haya terminado el cliente aún será capaz de consultar y descargar los resultados obtenidos ya que están almacenados temporalmente en su navegador mediante JavaScript.

5. La interfaz web de benchmarking

La interfaz web de benchmarking consta de dos pantallas, la primera (ver Fig. 5), permite al cliente configurar las opciones de ejecución. Una vez configurado se pueden generar los ficheros de configuración para ejecutar el benchmark de forma local o ejecutar el benchmark online. Esta última opción lleva a la página de ejecución del benchmark donde se puede visualizar como se ejecuta el benchmark y consultar o descargar los resultados.

5.1. Pantalla de configuración

Además de ejecutar los benchmarks de forma totalmente local modificando los ficheros de configuración, ver [12], también se puede utilizar la herramienta de configuración web [13] (ver Fig. 5).

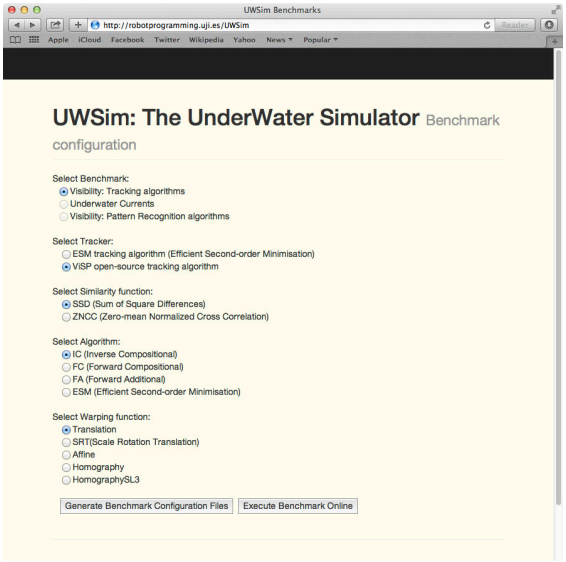


Figura 5: Herramienta de configuración de *benchmarks* para UWSim basada en web: ejemplo de configuración de un *benchmark* de visibilidad.

En el ejemplo de la figura se está configurando un benchmark de visibilidad. Las opciones a configurar incluyen, entre otras, la elección de dos tipos diferentes de tracking y sus opciones de funcionamiento. Una vez el usuario ha seleccionado los parametros y el benchmark esta configurado, se pueden generar los ficheros de configuración para ejecutar la simulación localmente o utilizar la herramienta de ejecución online en el servidor. Además, en el futuro esta herramienta será capaz de ejecutar código subido por los propios clientes para evaluarlo utilizando diferentes lenguajes como C, C++, Python, MATLAB, Simulink... etc, aunque esta opción está todavía en desarrollo.

5.2. Pantalla de ejecución del benchmark

Mientras se está ejecutando un benchmark, el usuario puede monitorizar su desempeño mediante la pantalla principal, el *feedback* secundario y los resultados. En la pantalla principal, el usuario puede moverse por el entorno mientras el benchmark se ejecuta de la misma forma que lo haría con la ventana del simulador (ver Fig. 6).

El feedback secundario es la zona situada a la derecha de la pantalla principal en la cual se muestra información relevante al benchmark en particular. Por ejemplo, en el caso de un benchmark de visibilidad, se muestra la cámara virtual sobre la que actúa el tracker con un recuadro sobre la detección del mismo. Esta zona, sin embargo, es una zona reservada para las características del benchmark y por tanto en otro tipo de benchmark puede mostrarse algo diferente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

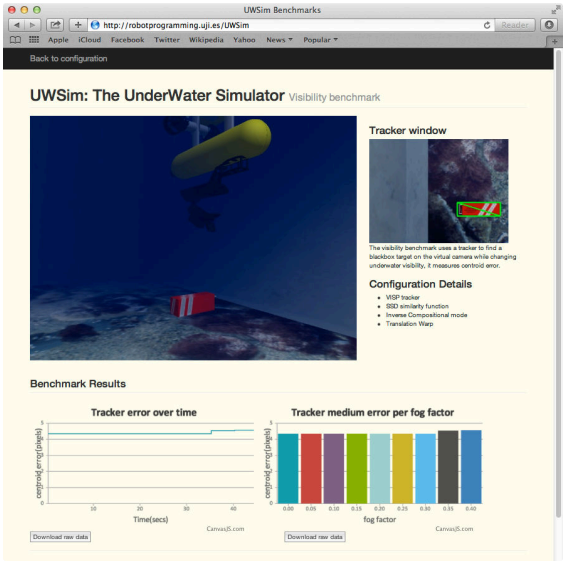


Figura 6: Herramienta de configuración de *benchmarks* para UWSim basada en web: el *benchmark* se está ejecutando en tiempo real. Es usuario puede también descargar los datos generados.

Por último, la zona de resultados muestra gráficas en tiempo real creadas mediante la librería `canvasJS`, una herramienta que permite mostrar datos de manera gráfica haciendo uso de HTML5, asegurando compatibilidad en distintos dispositivos como tablets, teléfonos...etc. En el caso de benchmarking de visibilidad, se muestra el error del tracker a lo largo del tiempo y el error medio del tracker según la visibilidad. Dependiendo del benchmark elegido pueden mostrarse diferentes resultados e incluso en un futuro podrá ser configurable por el usuario. Además, en cualquier momento pueden descargarse los datos de los gráficos en formato de texto para un posterior análisis utilizando el botón de la interfaz de usuario con la leyenda *"Download raw data"*.

6. Evaluación de trackers visuales en condiciones de visibilidad variable.

Utilizando las herramientas presentadas anteriormente es posible realizar *benchmarking*, llevando los algoritmos a su limite para conocer en qué condiciones pueden funcionar y qué resultados pueden obtener. De esta forma se pueden usar los mejores recursos disponibles en cada momento dependiendo de la situación.

El *benchmark* puede ser llevado a cabo modificando los ficheros de configuración y ejecutando localmente, utilizando la interfaz web para crear los ficheros de configuración [12] para ejecutarlo en la máquina local o utilizando la ejecución online.

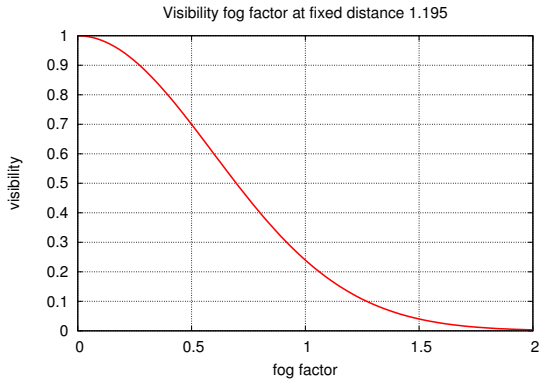


Figura 7: Relación de la visibilidad con el *fog factor*.

A continuación, se presenta un ejemplo de *benchmarking* realizado con UWSim para demostrar las capacidades del sistema presentado. El objetivo del experimento es evaluar cómo afectan las variaciones de turbidez del agua a un algoritmo de tracking visual. El escenario virtual es el que se presenta en [20], en el que el vehículo *Girona500* con un brazo *ARM5E* está situado en la piscina del CIRS (Centro de Investigación en Robótica Submarina) sobre una caja negra (Fig. 1). En él se comparan dos algoritmos de tracking ESM de Inria [21] y el template tracker de ViSP (Visual Servoing Platform, INRIA Lagadic) con diferentes configuraciones. Ambos algoritmos se inicializan automáticamente para seguir la posición de la caja negra en la cámara virtual evaluando su precisión en las esquinas y centroide.

Para variar la turbidez del agua en UWSim se utiliza la niebla submarina (*fog factor*) que es una medida independiente de la distancia, del estado del agua. Según la definición de visibilidad de openGL la visibilidad es un valor adimensional de 0 a 1 que nos indica con que nitidez podemos ver el objeto. Esta niebla submarina se relaciona con la visibilidad de manera exponencial en función de la distancia siguiendo la siguiente formula:

$$visibility = e^{-(fogfactor*distance)^2} \quad (1)$$

De esta forma se deduce que la visibilidad en la escena presentada, donde el *target* se encuentra a 1.195 metros, es la que se puede observar en la figura 7.

De igual forma, si fijamos una visibilidad de 0.01, se puede calcular la visibilidad en metros en función del *fog factor*. Esto lo podemos observar en la figura 8.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

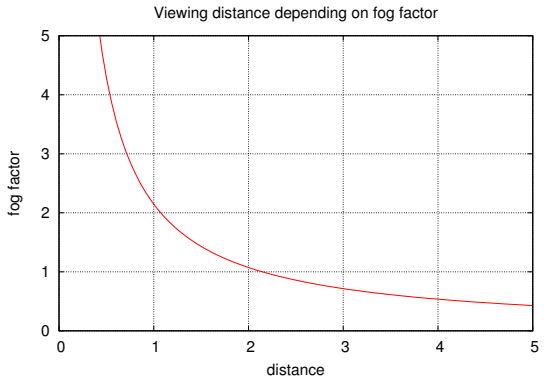


Figura 8: Distancia a la que los objetos son visibles en función del *fog factor*.

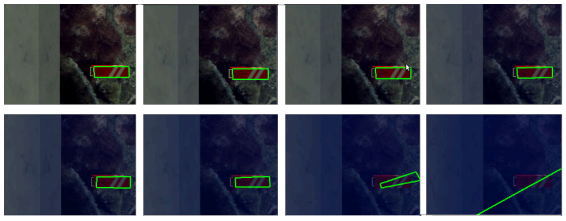


Figura 9: Capturas de pantalla del *tracker* visual ESM a lo largo del *benchmark*.

6.1. Tracking visual ESM

El primer algoritmo de *tracking* visual que se ha probado es el *ESM visual tracker* de Inria. En la Fig. 9 podemos observar como el tracker es capaz de encontrar con precisión la caja negra mientras la niebla incrementa en el *benchmark*. Finalmente cuando el nivel de niebla es elevado, y por tanto la visibilidad es mala, el tracker pierde el objetivo.

El resultado obtenido en este experimento es el que muestra la Fig. 10. Como se puede observar, el error es muy pequeño a lo largo de toda la simulación, por debajo de los 5 pixeles entre esquinas y centroide. Cuando la niebla alcanza un nivel de 1.25, el error incrementa drásticamente y finalmente el *tracker* no es capaz de seguir el objetivo. Según estos resultados el algoritmo de visión es fiable para niveles de niebla menores de 1.4.

6.2. ViSP visual tracker: métodos y *warps*

El tracker visual de ViSP (Visual Servoing Platform, INRIA Lagadic) utiliza algoritmos de registro de imágenes en lugar de las habituales aproximaciones basadas en características. Las funciones de similitud disponibles en ViSP para registro de imágenes son:

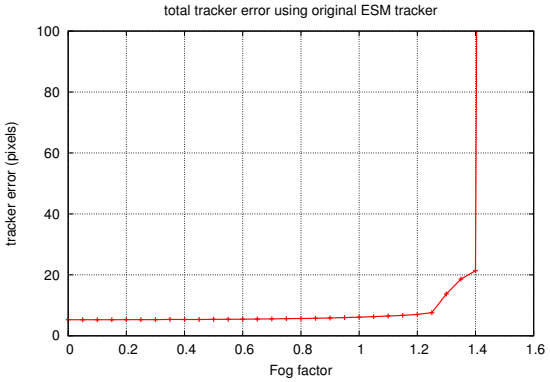


Figura 10: *Benchmark* de variación de la visibilidad: resultados del tracker ESM.

- SSD (Sum of Square Differences): Este método se puede utilizar de diferentes maneras: Inverse Compositional, Forward Compositional, Forward Additional, or ESM.
- ZNCC (Zero-mean Normalized Cross Correlation): Este método puede utilizarse de diferentes maneras: Inverse Compositional, Forward Additional.

Además de la función de similitud, ViSP permite el uso de diferentes *warps*. Los *warps* describen la transformación de la imagen buscada entre una imagen y la siguiente. El mejor *warp* depende de las restricciones de movimiento de la imagen que sigue, y por tanto, del problema en concreto. La librería ViSP ofrece 5 *warps* distintos:

- Translation: Esta es la transformación más sencilla de las que ofrece ViSP. Solo considera traslación en dos ejes (x e y).
- SRT (Scale Rotation Translation): La transformación SRT considera un escalado, una rotación en el eje z y una traslación 3D análoga al *translationwarp*.
- Affine: Este *warp* trata de conservar puntos, líneas rectas y planos.
- Homography: Estima los ocho parámetros de la matriz de homografía H.
- HomographySL3: Es exactamente igual a *Homography warp* pero los parámetros se estiman en el marco de referencia SL3.

Se han probado todas las combinaciones de *warp* y función de similitud en el *benchmark* de variación de visibilidad. Como el objeto a seguir no se mueve respecto a la cámara, el *warp* más restrictivo, en este caso el de traslación, debería ser el que

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

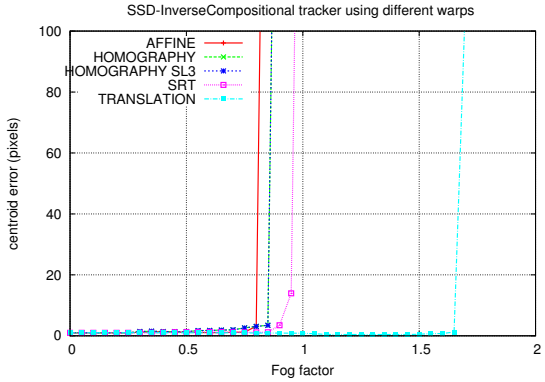


Figura 11: Benchmark de variación de la visibilidad: resultados para ViSP SSD-Inverse Compositional tracker.

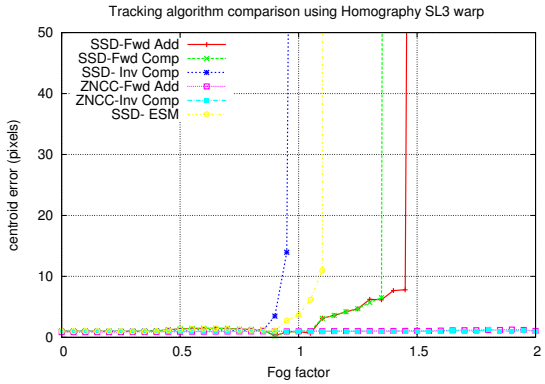


Figura 12: Benchmark de variación de la visibilidad: resultados para Homography SL3 warp.

ofrezca mejores resultados siendo capaz de seguir al objetivo con mayor cambio de visibilidad.

En la Fig. 11 podemos observar una comparación de los diferentes *warps* para una misma función de similitud. Como era de esperar, el *warp* menos restrictivo, traslación, consigue significativamente mejores resultados que los demás.

Como puede verse en la Fig. 12, en la cual se comparan las diferentes funciones de similitud para un mismo *warp*, las funciones que utilizan ZNCC ofrecen resultados mucho mejores, llegando al límite del experimento sin fallar. El resto de funciones de similitud consiguen diferentes resultados entre 0.9 y 1.45 de *fog factor*. Otro resultado interesante es que las funciones *inverse compositional* tienen un comportamiento asintótico, es decir, encuentran el objetivo con precisión hasta el momento de fallar drásticamente, lo cual es deseable para el caso de manipulación robótica.

Como conclusión, se puede decir que el tracker ViSP ZNCC-Inverse Compositional es el más robusto para el caso estudiado. Ofrece los mejores resultados para cambios de visibilidad en entorno submarino. El tracker ESM original obtiene buenos resultados comparados con los de ViSP, sin embargo, los trackers ZNCC y el *warp* de traslación consiguen mejores resultados.

Estos resultados obtenidos son un buen punto de partida para la elección de un software de *tracking* visual robusto para el sistema real. Además, es capaz de establecer los límites operacionales del sistema ayudando a elegir dinámicamente el mejor algoritmo en cada situación.

7. Conclusiones

En este trabajo se presenta una herramienta para ejecución online de *benchmarks* de intervención robótica mediante herramientas web para el simulador UWSim (UnderWater Simulator). Esta herramienta permite el diseño de experimentos de validación en un espacio web colaborativo de una forma sencilla y práctica para el usuario ya que no requiere instalar software.

Los benchmarks presentados se centran en el efecto de la visibilidad limitada para el algoritmo de *tracking*. Se han diseñado detallados *benchmarks* para tener en cuenta estas condiciones y extraer en qué condiciones son capaces de funcionar los algoritmos de visión submarina. Como trabajo futuro, la interfaz online está siendo mejorada de forma que será posible que el usuario envíe su propio código a comparar utilizando diferentes lenguajes como pueden ser C, C++, Python, Matlab, Simulink y además proporcionar "esqueletos" de funciones para que compararse sea aún más sencillo y rápido. Sin necesidad de descargar y ejecutar software de simulación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, código de proyecto DPI2011-27977-C03 (proyecto TRITON), por la Universitat Jaume I y Fundación Caixa Castelló-Bancaixa, proyecto PI·1B2011-17, y por la beca predoctoral de la Universitat Jaume I con código PREDOC/2012/47.

Referencias

[1] P. J. Sanz, P. Ridao, G. Oliver, G. Casalino, Y. Petillot, C. Silvestre, C. Melchiorri, and A. Turetta, "TRIDENT: An european project targeted to increase the autonomy levels for underwater intervention missions," in *OCEANS'13 MTS/IEEE conference. Proceedings*, San Diego, CA, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[2] M. Prats, J. Pérez, J. Fernández, and P. Sanz, "An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, 2012, pp. 2577–2582.

[3] J. Craighead, R. Murphy, J. Burke, and B. Goldiez, "A survey of commercial open source unmanned vehicle simulators," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, april 2007, pp. 852 – 857.

[4] O. Matsebe, C. Kumile, and N. Tlale, "A review of virtual simulators for autonomous underwater vehicles (AUVs)," *IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV'2008)*, 2008.

[5] Marine Simulation, "Marine Simulation ROVsim," Available online: http://marinesimulation.com.

[6] Fugro General Robotics Ltd., "Deepworks," Available online: http://www.fugrogrl.com/software/.

[7] GRL, "ROVolution, GRL (General Robotics Limited). ROV pilot training and mission planning simulator."

[8] R. Dillmann, "KA 1.10 Benchmarks for Robotics Research," University of Karlsruhe, Tech. Rep., 2004.

[9] D. Calisi, L. Iocchi, and D. Nardi, "A unified benchmark framework for autonomous Mobile robots and Vehicles Motion Algorithms (MoVeMA benchmarks)," in *Workshop on experimental methodology and benchmarking in robotics research (RSS 2008)*, 2008.

[10] B. Taylor, S. Balakirsky, E. Messina, and R. Quinn, "Analysis and benchmarking of a Whegs robot in USARSim," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, sept. 2008, pp. 3896–3901.

[11] O. Michel and F. Rohrer, "The Rat's Life benchmark: competing cognitive robots," in *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, ser. PerMIS'08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 43–49. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/1774674.1774682

[12] UWSim-Benchmarks. (2014) The UWSim Benchmarks Workspace. Available online: http://sites.google.com/a/uji.es/uwsim-benchmarks.

[13] ——. (2014) UWSim: The UnderWater Simulator online. Available online: http://robotprogramming.uji.es/UWSim/config.html.

[14] S. Ulbrich, D. Kappler, T. Asfour, N. Vahrenkamp, A. Bierbaum, M. Przybylski, and R. Dillmann, "The opengrasp benchmarking suite: An environment for the comparative analysis of grasping and dexterous manipulation," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, Sept 2011, pp. 1761–1767.

[15] G. Kootstra, M. Popović, J. Jørgensen, D. Kragic, H. Petersen, and N. Krüger, "Visgrab: A benchmark for vision-based grasping," *Paladyn*, vol. 3, no. 2, pp. 54–62, 2012. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2478/s13230-012-0020-5

[16] B. Cohen, I. Sucan, and S. Chitta, "A generic infrastructure for benchmarking motion planners," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, Oct 2012, pp. 589–595.

[17] M. Quigley, K. Conley, B. P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.

[18] FP7-MORPH, "Marine Robotic System of Self-Organizing, Logically Linked Physical Nodes (MORPH)," http://morph-project.eu/.

[19] FP7-PANDORA, "Persistent Autonomy through learNing, aDaptation, Observation and Re-plAnning (PANDORA)," http://persistentautonomy.com/.

[20] J. Pérez, J. Sales, M. Prats, J. V. Martí, D. Fornas, R. Marín, and P. J. Sanz, "The underwater simulator UWSim: Benchmarking capabilities on autonomous grasping," in *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 2013.

[21] E. Malis, "Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques," in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 2, 26-may 1, 2004, pp. 1843 – 1848 Vol.2.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SISTEMA DE CONTROL DE HELICÓPTEROS MEDIANTE FIJACIÓN POR CABLE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO ANTE PERTURBACIONES DE LAS VARIACIONES DE LA GUIÑADA EN VUELO ESTACIONARIO

Álvaro Caballero
Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España, alvaro_caballero_92@hotmail.com

Manuel Béjar
Universidad Pablo de Olavide, Ctra. Utrera km 1, 41013, Sevilla, España, mbejdom@upo.es

Aníbal Ollero
Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España, aollero@us.es

Resumen

La ejecución de la maniobra de vuelo estacionario ("hovering") de un helicóptero autónomo es muy importante para distintas aplicaciones de robótica aérea. Sin embargo, esta maniobra puede verse afectada seriamente por perturbaciones como las ráfagas de viento. El efecto de estas perturbaciones es muy significativo en el caso de aplicaciones de inspección o vigilancia que requieren cambios de la guiñada a la vez que se mantiene una posición fija. Para conseguir mayor estabilidad en maniobras de este tipo, el trabajo que se presenta en este artículo emplea un cable que une al helicóptero con tierra, lo que permite beneficiarse de la acción estabilizadora de la tensión en el cable. El artículo presenta el desarrollo de un controlador para el helicóptero en el que la ley de control se diseña mediante algoritmos de asignación de ganancias que mejoran la acción de control teniendo en cuenta la guiñada. El artículo incluye simulaciones que ponen de manifiesto la ventaja que presenta la utilización del cable cuando se compara con el vuelo libre, en ambos casos bajo el efecto de perturbaciones.

Palabras clave: Vehículo aéreo no tripulado · Helicóptero · LQI · Gain Scheduling · Cable · Aumento de Estabilidad · Mejora rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) han atraído un gran interés. Por un lado su mayor maniobrabilidad con respecto a vehículos terrestres les aporta un valor añadido en aplicaciones de recogida de información o incluso de despliegue de instrumentación. Por otro lado, se evita el riego humano que existe en vehículos aéreos pilotados. Además los costes operacionales suelen ser también menores que en vehículos tripulados.

Entre las diferentes configuraciones posibles de UAV, los helicópteros poseen capacidades de vuelo estacionario y despegue/aterrizaje vertical lo que los hace adecuados para numerosas aplicaciones de robótica aérea tales como la inspección y la vigilancia. Por otra parte, los helicópteros tienen normalmente una mayor carga útil y tiempo de vuelo que los multi-rotores.

En la literatura reciente se han propuesto bastantes avances relacionados con el control de helicópteros, pero pocos de estos trabajos prestan atención al caso particular del rendimiento en vuelo con cable de fijación, siendo las referencias más significativas [3] y [4]. Con objeto de lograr avances en ese campo, este artículo propone una configuración distinta a la habitual para el control de helicópteros que busca mejorar el rendimiento ante perturbaciones cuando se realizan variaciones de la guiñada en vuelo estacionario. Esta nueva configuración consiste en fijar el helicóptero a tierra utilizando un cable y mediante un dispositivo en el punto de fijación en tierra controlar la tensión del cable para sacar partido de su efecto estabilizador. Además, esta configuración ofrece un beneficio adicional ya que una sensorización adecuada del cable permite realizar una estimación de la posición del helicóptero distinta a la del GPS.

El artículo comienza presentando una descripción del modelo empleado en la Sección 2 con el fin de justificar las mejoras que aporta la configuración aumentada basada en el uso del cable. A continuación, la Sección 3 muestra el procedimiento seguido para diseñar un controlador del sistema libre (helicóptero sin cable) que está optimizado para realizar variaciones de la guiñada en vuelo estacionario, incluyéndose varias simulaciones. En la Sección 4 se aplica el controlador anterior al sistema aumentado con el cable, siguiendo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

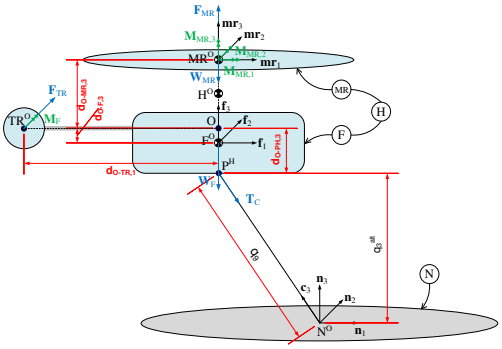


Figura 1: Esquema del helicóptero con cable: descripción de los sistemas de referencia (N, F, MR) , centros de masas (F^O, MR^O, H^O), puntos (TR^O, O, P^H), dimensiones ($d_{O-P,i}$) de interés, fuerzas y momentos aplicados al helicóptero.

las pautas de diseño que se han establecidos en trabajos anteriores. Con el fin de validar las metodologías seguidas, la Sección 5 presenta varias simulaciones del helicóptero con el cable ante perturbaciones producidas durante maniobras de variación de la guiñada. Finalmente, en la Sección 6 se exponen las conclusiones obtenidas.

2. MODELADO DEL SISTEMA

En esta sección se presenta el modelo resultante de la configuración con cable (ver Fig.1). Una descripción en más detalle de dicho modelo puede verse en [2].

2.1. HELICÓPTERO LIBRE

La dinámica de helicópteros pequeños con un rotor principal rígido puede ser descrita por un modelo mecánico, ya que intentos por incluir un elaborado modelo aerodinámico del rotor principal en el diseño del controlador no han contribuido con una mejora significativa en los experimentos.

La caracterización mecánica del helicóptero consta de dos cuerpos rígidos separados, el fuselaje F (con masa m_F) y el rotor principal rígido MR (modelado como un delgado disco sólido con masa m_{MR} y velocidad angular constante ω_{MR}), mientras que el rotor de cola TR^O solo actúa como un punto de aplicación de fuerza en el fuselaje.

Con relación a las fuerzas y momentos aplicados sobre el helicóptero, el rotor principal genera una fuerza $\mathbf{F}_{MR} = f_{MR,3}\mathbf{f_3}$ aplicada en el centro de masas MR^O, y momentos $\mathbf{M}_{MR,i} = t_{MR,i}\mathbf{f_i}\,(i = 1,2,3)$ aplicados en el rotor principal, mientras que el rotor de cola genera una fuerza $\mathbf{F}_{TR} = f_{TR,2}\mathbf{f_2}$ aplicada en el punto TR^O, y un momento $\mathbf{M}_F = t_{TR,2}\mathbf{f_2}$ sobre el fuselaje. Se considera también la fuerza de gravedad $\mathbf{W}_j = -m_j g\mathbf{n_3}\,(j = F, MR)$ aplicada en el centro de masas F^O y MR^O, siendo g la aceleración de la gravedad.

Las ecuaciones cinemáticas diferenciales para la traslación son:

$$\dot{q}_i = u_i \quad (i = 1,2,3) \tag{1}$$

mientras que para la rotación:

$$\begin{aligned} \dot{q}_4 &= -\left(s_6u_5 - c_6u_4\right)/c_5 \\ \dot{q}_5 &= s_6u_4 + c_6u_5 \\ \dot{q}_6 &= u_6 + s_5\left(s_6u_5 - c_6u_4\right)/c_5 \end{aligned} \tag{2}$$

donde $q_i(t)\,(i = 1,2,3)$ y $u_i(t)\,(i = 1,2,3)$ son, respectivamente, las coordenadas generalizadas y velocidades generalizadas que describen la posición $\mathbf{p}^{N^O \to H^O}$ y velocidad ${}^N\mathbf{v}^{H^O}$ del centro de masas H^O en el sistema de referencia inercial N; $q_i(t)\,(i = 4,5,6)$ son los ángulos de Euler del cuerpo en el orden 1-2-3 (alabeo, cabeceo y guiñada) describiendo la orientación de los ejes F en el sistema de referencia inercial N; $u_i(t)\,(i = 4,5,6)$ son las velocidades generalizadas describiendo la velocidad angular ${}^N\omega^F$ expresada en los ejes F; y $s_i = \sin(q_i)$, $c_i = \cos(q_i)$.

Las ecuaciones diferenciales dinámicas para la traslación siguiendo la metodología de Kane son:

$$\begin{aligned} m_H\dot{u}_1 &= f_{MR,3}s_5 - f_{TR,2}c_5s_6 \\ m_H\dot{u}_2 &= f_{TR,2}\left(c_4c_6 - s_4s_5s_6\right) - f_{MR,3}s_4c_5 \\ m_H\dot{u}_3 &= f_{MR,3}c_4c_5 + f_{TR,2}\left(s_4c_6 + c_4s_5s_6\right) - m_Hg \end{aligned} \tag{3}$$

mientras que para la rotación son:

$$\begin{aligned} I_{H11}\dot{u}_4 &= t_{MR,1} + d_{O-H^O,3}f_{TR,2} + \\ &\quad + \left(\left(I_{H22} - I_{H33}\right)u_6 - 2I_{MR11}\omega_{MR}\right)u_5 \\ I_{H22}\dot{u}_5 &= t_{MR,2} + t_{TR,2} + \\ &\quad + \left(\left(I_{H33} - I_{H11}\right)u_6 + 2I_{MR11}\omega_{MR}\right)u_4 \\ I_{H33}\dot{u}_6 &= t_{MR,3} + d_{O-TR^O,1}f_{TR,2} + \\ &\quad + \left(I_{H11} - I_{H22}\right)u_4u_5 \end{aligned} \tag{4}$$

donde $m_H = m_F + m_{MR}$ es la masa total, I_{MR11} es el momento principal de inercia del rotor principal MR, $I_{Hii}\,(i = 1,2,3)$ son los momentos principales de inercia correspondientes al sistema completo y $d_{O-H^O,3} = \left(m_F \cdot d_{O-F^O,3} + m_{MR} \cdot d_{O-MR^O,3}\right)/m_H$.

Dado que se utiliza sólo el modelo mecánico para el análisis del modelo y para el diseño del controlador, las fuerzas y momentos $f_{MR,3}$, $t_{MR,1}$, $t_{MR,2}$ y $f_{TR,2}$ ejercidos sobre el sistema serán considerados como las entradas del sistema.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

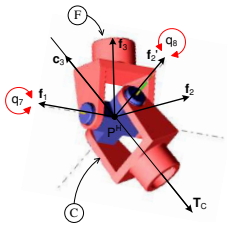


Figura 2: Junta universal en el punto P^H

2.2. HELICÓPTERO CON CABLE

Cuando contamos con el efecto del cable en el modelo, se supone para simplificar que un extremo del cable coincide con el origen del sistema inercial N mientras que el otro está conectado al helicóptero en el punto P^H descrito en la figura 1. En esta configuración, la posición del helicóptero respecto del sistema inercial N queda definida por las coordenadas generalizadas $q_{7,8,9}(t)$. Como se puede ver en la Fig.2, el dispositivo que une el cable al helicóptero es una junta universal, denotada por los ejes C. Además, las variables angulares $q_{7,8}(t)$ se corresponden con dos rotaciones sucesivas en el punto P^H que alinean el vector $\mathbf{f_3}$ de los ejes del fuselaje con la línea del cable definida por el vector $\mathbf{c_3}$. La restante coordenada $q_9(t)$ define la longitud instantánea del cable como se muestra en la Fig.1. Además la posición del punto P^H viene dada por:

$$\mathbf{p}^{N^O \to P^H} = q_9 \mathbf{c_3} \quad (5)$$

mientras que el vector tensión del cable está definido por:

$$\mathbf{T}_C = -T_C \mathbf{c_3} \quad (6)$$

Con el fin de emplear las variables angulares $q_{7,8}$ y la longitud del cable q_9 como variables para determinar la posición del helicóptero, la siguiente expresión sustituirá a las ecuaciones (1):

$$[\dot{q}_7 \;\; \dot{q}_8 \;\; \dot{q}_9]^T = \mathbf{M}^{3\times 6}\left(q_{4,\cdots,9}\right) \cdot [u_1 \;\; \cdots \;\; u_6]^T \quad (7)$$

Aunque es cierto que las ecuaciones cinemáticas (7) son más complejas que (1) ($\mathbf{M}$ es una matriz densa), la ventaja de usar estas nuevas variables $q_{7,8,9}$ mientras se mantienen las variables $u_{1,2,3}$ viene dada por las ecuaciones diferenciales dinámicas, las cuales son mucho más compactas para la configuración con cable. Éstas son para la traslación:

$$\begin{aligned} m_H \dot{u}_1 &= RHS_1 + T_C(s_5 c_7 c_8 + c_5 s_6 s_7 c_8 + \\ &\quad + c_5 c_6 s_8) \\ m_H \dot{u}_2 &= RHS_2 + T_C(s_8(c_4 s_6 + s_4 s_5 c_6) + \\ &\quad - s_4 c_5 c_7 c_8 - s_7 c_8 (c_4 c_6 - s_4 s_5 s_6)) \\ m_H \dot{u}_3 &= RHS_3 + T_C(s_8(s_4 s_6 - c_4 s_5 c_6) + \\ &\quad + c_4 c_5 c_7 c_8 - s_7 c_8 (s_4 c_6 + c_4 s_5 s_6)) \end{aligned} \quad (8)$$

y para la rotación:

$$\begin{aligned} I_{H11} \dot{u}_4 &= RHS_4 + T_C d_{P^H - H^O,3} s_7 c_8 \\ I_{H22} \dot{u}_5 &= RHS_5 + T_C d_{P^H - H^O,3} s_8 \\ I_{H33} \dot{u}_6 &= RHS_6 \end{aligned} \quad (9)$$

donde RHS_i es la parte derecha de las ecuaciones (3) y (4).

Como puede observarse de las ecuaciones (8) y (9), el efecto del cable es doble. Por un lado la tensión del cable proporciona robustez frente a perturbaciones externas tales como viento lateral o longitudinal dado que la proyección de esta fuerza en el plano horizontal se opone siempre a la perturbación. Por otro lado, el momento inducido por no estar la tensión aplicada en el centro de masas del sistema produce un acoplamiento no deseado entre las dinámicas rotacional y traslacional lo que hace más difícil el control del sistema.

3. CONTROL DEL SISTEMA LIBRE

3.1. CONTROL LQI

Como punto de partida para el desarrollo de un controlador del sistema libre que realice el seguimiento de referencias en posición y guiñada, se propone una ley de control lineal cuadrática integral (LQI). En particular, dado un sistema en el espacio de estados, la ley de control se obtiene como sigue:

$$\delta\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K_{LQI}} \cdot \delta\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

donde $\delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x^0}$ y $\delta\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u^0}$ con $\mathbf{x} = [q_4\, q_5\, q_6\, q_7\, q_8\, q_9\, u_1\, u_2\, u_3\, u_4\, u_5\, u_6\, z_1\, z_2\, z_3\, z_6]^T$, $\mathbf{u} = [f_{MR,3}\;\; t_{MR,1}\;\; t_{MR,2}\;\; f_{TR,2}]^T$, $\mathbf{z_i} = \int \left(\mathbf{q_i^{ref}}(t) - \mathbf{q_i}(t)\right) dt$ $(i = 1,2,3,6)$ y $\mathbf{x^0}$ y $\mathbf{u^0}$ el punto de funcionamiento de forma que se minimice la función objetivo:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\delta\mathbf{u}(t)) &= \frac{1}{2}\int (\delta\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q_x} \delta\mathbf{x}(t) + \\ &\quad + \delta\mathbf{u}(t)^T \mathbf{R_u} \delta\mathbf{u}(t)) dt \end{aligned} \quad (11)$$

siendo $\mathbf{Q_x}$ y $\mathbf{R_u}$ matrices diagonales de ponderación definidas positivas. Con todo lo anterior el cálculo de esta ley de control pasa por resolver una ecuación de Riccatti que permitirá obtener $\mathbf{K_{LQI}}$.

Con objeto de particularizar la ley de control para los requerimientos de un sistema determinado, es posible ajustar los elementos de las matrices de ponderación, y en particular la definición de la matriz $\mathbf{Q_x}$. En el caso del helicóptero, el principal objetivo de ajuste consiste en establecer una escala temporal más rápida en la dinámica rotacional de guiñada que en las dinámicas rotacionales restantes de balanceo y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cabeceo. De esta forma, los productos cruzados de (4) entre las velocidades angulares de cabeceo/balanceo y la velocidad angular de guiñada dejan de ser no lineales puesto que la velocidad angular de guiñada tiene un comportamiento similar al de un valor constante desde el punto de vista de la dinámica de cabeceo/ balanceo. El razonamiento anterior lleva a proponer una mayor ponderación del término relativo al seguimiento de la referencia en guiñada lo cual también producirá un mejor rendimiento del seguimiento de variaciones de la guiñada: $diag(\mathbf{Q_x}) = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 10, 10, 10, 100]$. En la Fig.3 se muestran los resultados de una simulación realizada para un helicóptero libre ante la presencia de una perturbación lateral durante vuelo estacionario. En ella puede apreciarse cómo el ajuste anterior de $\mathbf{Q_x}$ permite obtener un mejor rendimiento del sistema en guiñada puesto que el sistema está en todo momento más cerca del punto de diseño (q_1, q_2, q_3 fijos y $q_6 = 0^o$). Además, este mejor rendimiento se consigue sin empeorar el comportamiento del resto de variables de interés. Las consideraciones anteriores para la sintonía de la matriz $\mathbf{Q_x}$ del sistema libre también serán de aplicación en el sistema aumentado con el cable.

3.2. GAIN SCHEDULING

En un sistema controlado mediante la metodología anterior se puede comprobar que el comportamiento en bucle cerrado es fuertemente dependiente del valor del ángulo de guiñada q_6 para el cual se haya linealizado el sistema dentro del proceso de diseño del controlador. Esto hace que si nos alejamos lo suficiente del valor de q_6 de diseño, nuestro sistema se inestabilice (Fig. 4). Por ello, y en particular para aplicaciones que requieran grandes variaciones de la guiñada, se propone mejorar el sistema empleando la técnica de Gain Scheduling o Asignación de Ganancias, mediante la cual el controlador adaptará sus ganancias en función de la condición de operación en guiñada.

Para realizar la Planificación de Ganancias, debe investigarse cuál debe ser el ancho de los subintervalos en que se divide el rango de operación de la guiñada Δ_{GS}. Con tal fin primero se planteó un estudio preliminar de la influencia del punto de operación en q_6 mediante los autovalores del sistema lineal en bucle cerrado. Para ello, se realizó un barrido de valores de la guiñada ($q_6 = 0^o$ ... 180^o) para la obtención de diferentes linealizaciones del sistema (matrices A,B,C,D), pero siempre con la matriz de control $\mathbf{K_{LQI}}$ correspondiente al diseño para $q_6 = 0^o$. En particular se observó que para valores de $q_6 > 56^o$ el modelo lineal pasaba de tener todos sus autovalores con parte real negativa a tener uno de éstos con parte real positiva, por lo que el sistema se volvía inestable. Las

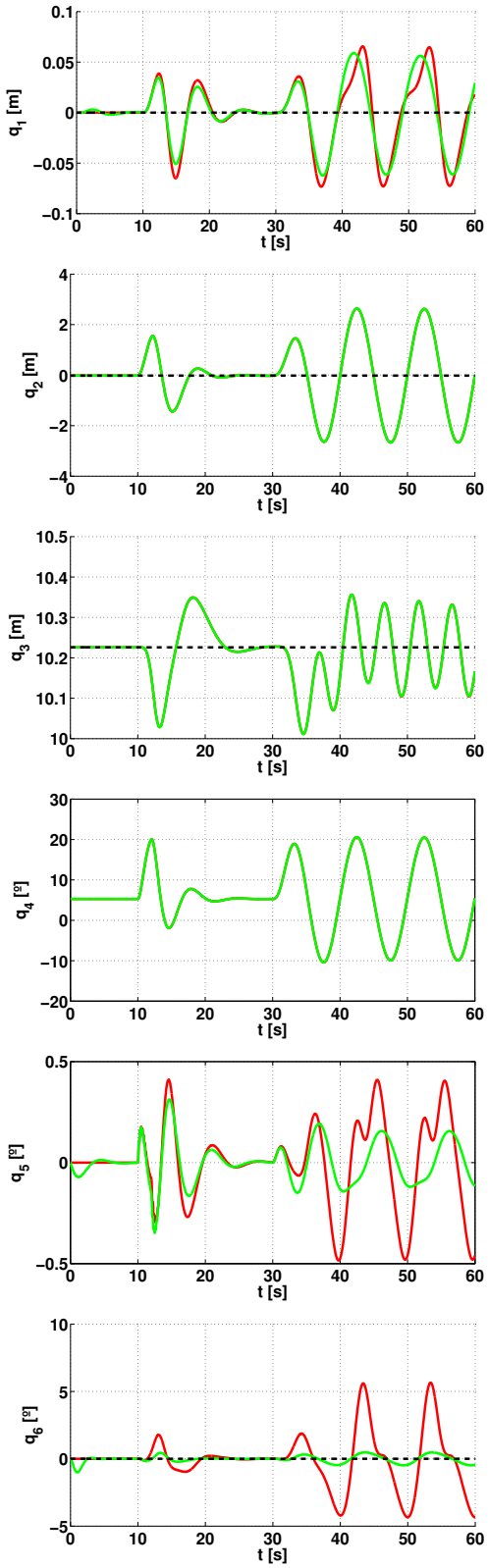


Figura 3: Evolución de la posición y orientación durante vuelo estacionario y ante la presencia de una perturbación lateral. En negro la referencia, en rojo para un ajuste de $diag(\mathbf{Q_x}) = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 10\ 10\ 10\ 10]$ y en verde para $diag(\mathbf{Q_x}) = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 10\ 10\ 10\ 100]$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

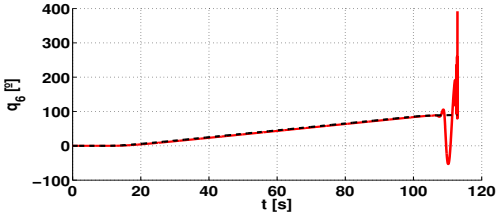


Figura 4: Evolución de la guiñada durante el seguimiento de rampa en q_6. El sistema se vuelve inestable.

Fig.5-7 muestran los correspondientes autovalores.

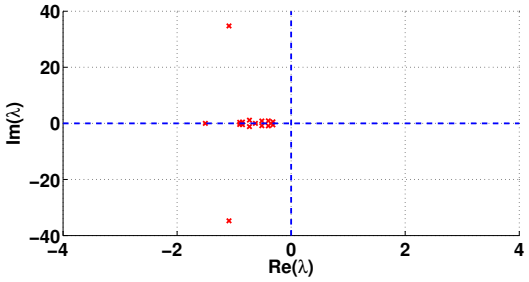


Figura 5: Autovalores para A y B calculadas en el punto de diseño del controlador.

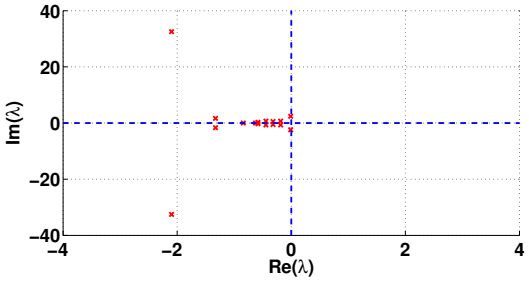


Figura 6: Autovalores para A y B alejadas q_6 =56º del q_6 de diseño del controlador. Todos los autovalores con parte real negativa.

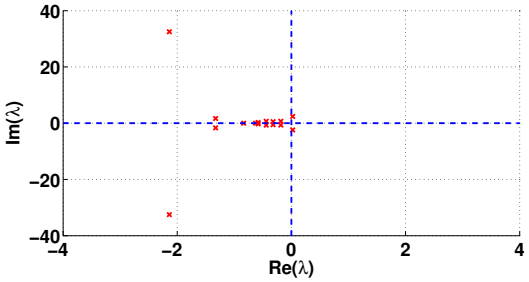


Figura 7: Autovalores para A y B alejadas q_6 =57º del q_6 de diseño del controlador. Existe un par complejo conjugado con parte real positiva.

Las conclusiones que se obtuvieron sobre el modelo lineal (umbral de $q_6 = 56^o$) se tomaron como punto de partida para analizar el efecto de las variaciones de q_6 pero ya sobre el sistema no lineal, pudiendo comprobarse que alejándonos más de 56º en el modelo no lineal, el sistema también se vuelve inestable. Además, se puede demostrar mediante simulación que se obtienen los mismos resultados alejándonos q_6=56º del punto de diseño del controlador, independientemente del valor de q_6 para el que éste haya sido diseñado. Véase la Fig.8.

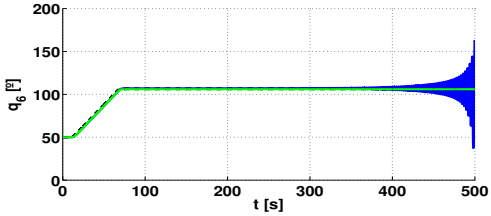


Figura 8: Evolución de la guiñada durante el seguimiento de rampa con q_6 de diseño del controlador igual a 50º. En verde hasta $q_6 = 106^o$ y en azul hasta $q_6 = 107^o$. Se observa la frontera entre sistema estable y sistema inestable.

Para la operación del sistema empleando Gain Scheduling, las ganancias se calculan en cada momento por interpolación de las ganancias obtenidas en cada uno de los puntos que definen los distintos subintervalos Δ_{GS} durante la etapa de diseño del controlador. Esta interpolación hará que las ganancias aplicadas al sistema tengan un valor más cercano al óptimo para cada punto de operación si comparamos este enfoque con el que resultaría de tomar sin ninguna modificación las ganancias de los extremos del intervalo en el que se realiza la interpolación. El razonamiento anterior justifica el umbral resultante en $\Delta_{GS} = 92^o$ a la hora de definir la condición de estabilidad para el sistema. La Fig.9 muestra este resultado, el cual lleva a la conclusión de que para la implementación de Gain Scheduling sobre nuestro sistema se debe de seleccionar $\Delta_{GS} \leq 92^o$ ya que de no ser así, no se puede garantizar que nuestro sistema sea estable en todo el rango de valores de la guiñada.

Con el fin de conocer qué valores de Δ_{GS} dentro del rango anterior consiguen un mejor rendimiento del sistema, se ha realizado un estudio complementario. La Fig.10 muestra los resultados de la simulación del seguimiento del helicóptero libre de una referencia en q_6 en forma de rampa de pendiente 1º/seg y aplicada en el momento de simulación t=10s desde $q_6 = 0^o$ hasta $q_6 = 90^o$. En dicha figura puede apreciarse cómo con la técnica de Gain Scheduling, el sistema es capaz de seguir la rampa de forma estable y con bastante precisión, algo que no sucede sin Gain Scheduling (ver Fig.4). Desde el punto de vista de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

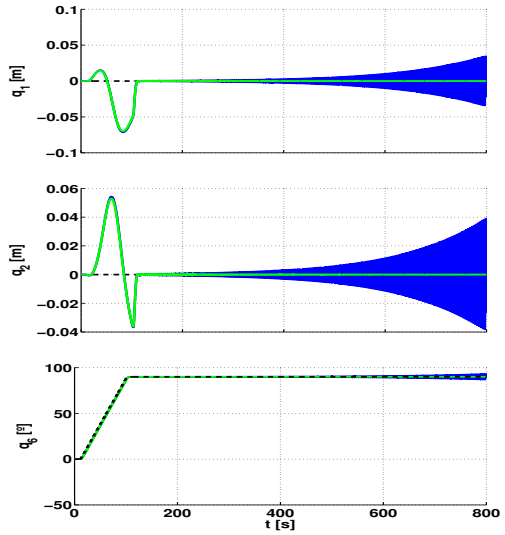


Figura 9: Seguimiento de rampa en q_6 para $\Delta_{GS} = 92^{\text{o}}$ (verde) y $\Delta_{GS} = 93^{\text{o}}$ (azul). Las referencias en negro con línea discontinua. Se observa la frontera entre sistema estable y sistema inestable.

la optimización del rendimiento se puede comprobar cómo a medida que Δ_{GS} se hace más pequeño el desempeño del controlador mejora pero de manera no muy significativa, lo que lleva a concluir que a partir de $\Delta_{GS} < 93^{\text{o}}$ un ancho de los subintervalos más pequeño no aporta beneficios considerables.

4. CONTROL DEL SISTEMA COMPLETO

En esta sección se incorpora el cable al sistema y se presentan los conceptos necesarios para controlar al helicóptero en esa configuración.

4.1. PREALIMENTACIÓN

Como ya se mencionó, el efecto del cable en nuestro sistema es doble. Por un lado proporciona robustez frente a perturbaciones pero al mismo tiempo produce un acoplamiento entre las dinámicas traslacional y rotacional que dificulta el control. Para mitigar este segundo efecto se empleará una prealimentación (”feed-forward”) la cual estimará el vector del momento que produce el cable sobre el helicóptero. Para este propósito será necesario tener una estimación del vector de tensión del cable, que se realizará mediante dos codificadores ópticos que medirán los ángulos $q^m_{7,8}$ y una célula de carga para medir el módulo de la tensión T^m_C. Con estas medidas el momento producido por el cable se calcula como:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_C &= \mathbf{p}^{P^H \to H^O} \times \mathbf{T}_C \\ M_{C,1} &= \mathbf{M}_C \cdot \mathbf{f_1} = T^m_C d_{P^H - H^O,3} \sin(q^m_7) \cos(q^m_8) \\ M_{C,2} &= \mathbf{M}_C \cdot \mathbf{f_2} = T^m_C d_{P^H - H^O,3} \sin(q^m_8) \end{aligned} \quad (12)$$

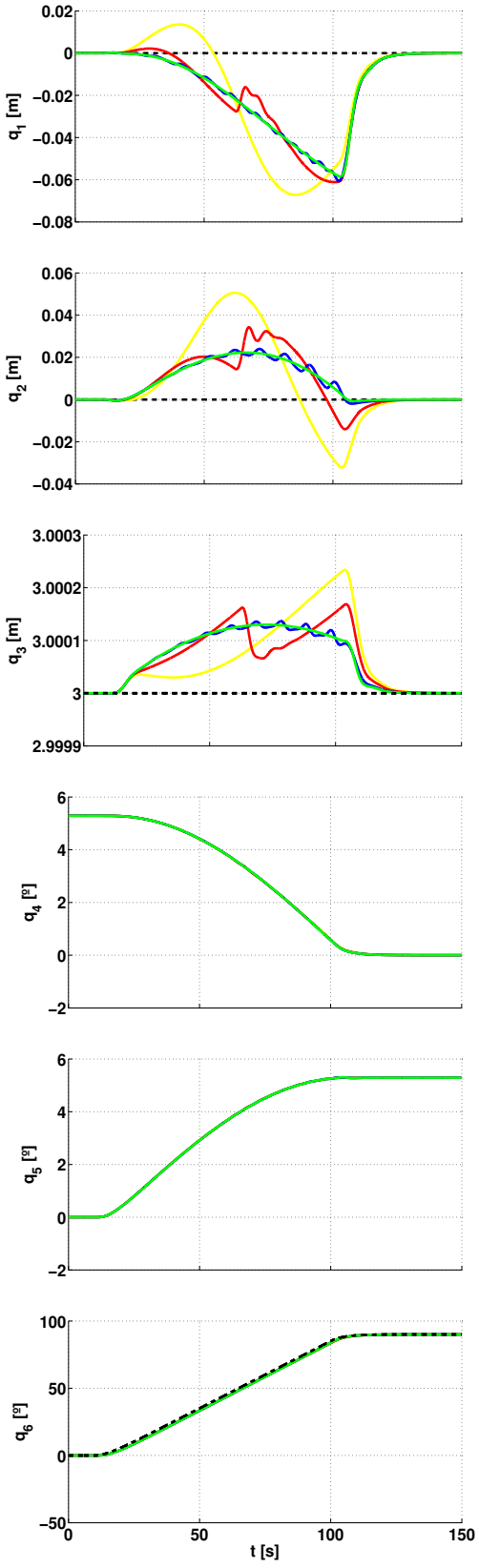


Figura 10: Posición y orientación en el seguimiento de rampa en q_6 para $\Delta_{GS} = 90^{\text{o}}$ (amarillo), $\Delta_{GS} = 45^{\text{o}}$ (rojo), $\Delta_{GS} = 10^{\text{o}}$ (azul) y $\Delta_{GS} = 1^{\text{o}}$ (verde). Las referencias aparecen en negro con línea discontinua.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.2. CONTROLADOR DE LA TENSIÓN DEL CABLE

Se propone el uso de un dispositivo en tierra para controlar en todo momento la tensión del cable de forma que se maximicen los efectos estabilizantes del cable, a la vez que la influencia indeseada en la dinámica rotacional se mantiene bajo control. En particular, este dispositivo estará encargado de mantener la tensión del cable en torno a un valor de referencia constate T_C^*. El error entre T_C^* y T_C^m se usará para generar la velocidad de despliegue del cable deseada U_C^* mediante un control proporcional de la forma:

$$U_C^* = K_P^C \cdot (T_C^* - T_C^m) \tag{13}$$

Finalmente y respecto a T_C^*, por los motivos mencionados en [3] la magnitud de la tensión de referencia no debe exceder el 20 % del valor de $f_{MR,3}$ correspondiente a la condición de vuelo estacionario.

5. SIMULACIONES

Con el fin de ilustrar las ventajas que aporta el sistema con cable con respecto al helicóptero libre se han realizado una serie de simulaciones del seguimiento de una referencia en forma de rampa para la guiñada. En particular, se ha utilizado una rampa aplicada en t=50s y que durante 20s varía su valor desde $q_6 = 0^o$ hasta $q_6 = 90^o$. Además se ha considerado la inclusión de perturbaciones de viento modeladas mediante una fuerza F_W aplicada en el centro de masas del helicóptero y con la forma mostrada en la Fig.11. Esta perturbación se aplicará primero en la dirección longitudinal determinada por $\mathbf{n_1}$ y después en la dirección lateral determinada por $\mathbf{n_2}$. La Fig.12 muestra los resultados correspondientes a las simulaciones descritas anteriormente. En ellas se puede apreciar cómo el helicóptero con cable mejora su rendimiento con respecto al helicóptero libre en la dirección en la que se produce la perturbación. También se aprecia alguna mejora aunque de menor escala en la variable q_3. Finalmente con respecto a la guiñada el seguimiento es bastante bueno en ambos casos puesto que se mantienen los beneficios conseguidos con el ajuste adecuado de la matriz de ponderación $\mathbf{Q_x}$ y la técnica de gain scheduling que se presentaron en apartados anteriores.

6. CONCLUSIONES

Este artículo ha mostrado los beneficios de fijar un helicóptero a tierra mediante un cable en aplicaciones en las que se necesite realizar un vuelo de hovering a la vez que se ejecuta una variación en la guiñada, y todo ello ante la presencia de perturbaciones de viento. Si bien la ganancia anterior viene dada por la robustez que aporta el cable ante perturbaciones

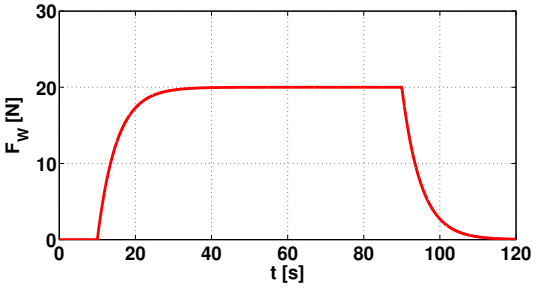


Figura 11: Perturbación aplicada durante las simulaciones del seguimiento de referencia en la guiñada.

en la dinámica traslacional, la incorporación del cable también presenta un efecto menos positivo debido al acoplamiento entre la dinámica rotacional y traslacional que produce el par inducido por la tensión del cable, el cual no obstante puede ser mitigado empleando una prealimentación.

Con respecto al ajuste del controlador LQI que se ha propuesto para esta prueba de concepto, se han presentado los criterios de sintonización de la matriz de ponderación $\mathbf{Q_x}$ que consiguen un mejor rendimiento del sistema. Además también se ha presentado una extensión de la ley de control anterior mediante la técnica de Planificación de Ganancias, necesaria para el tipo de aplicaciones consideradas en las que los valores de la guiñada pueden variar con el tiempo en rangos relativamente amplios, lo que es relevante para muchas aplicaciones.

Referencias

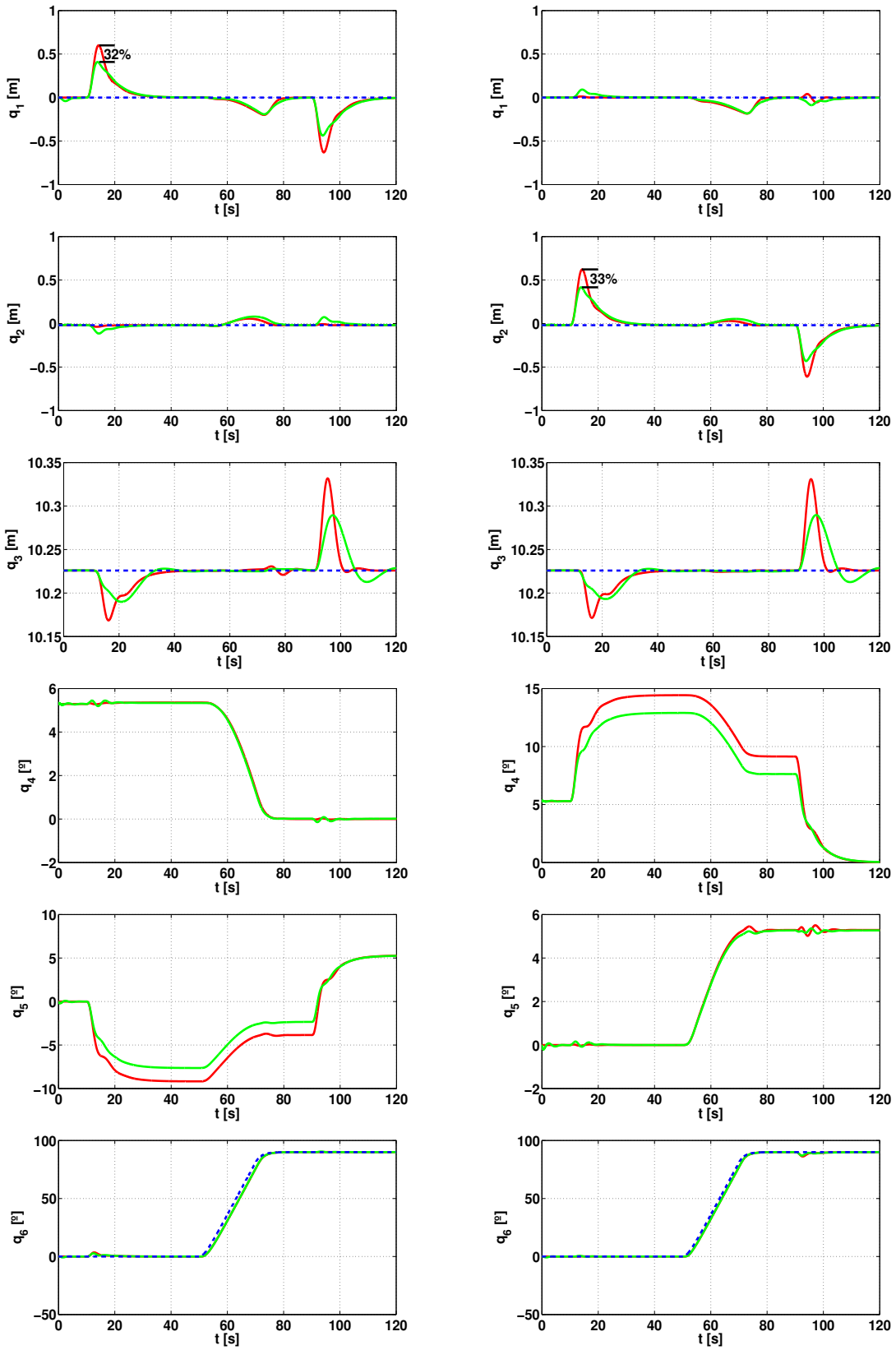
[1] Kondak, K., Bernard, M., Losse, & N.,Hommel, G. (2006). Elaborated modeling and control for autonomous small size helicopters. VDI Berichte vol. 1956, 207-216.

[2] Sandino, L. A., Bejar, M. & Ollero, A. (2013). A Survey on Methods for Elaborated Modeling of the Mechanics of a Small-Size Helicopter. Analysis and Comparison. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 0921-0296, 1-4.

[3] Sandino, L. A., Bejar, M., Kondak, K., & Ollero, A. (2013). On the use of tethered configurations for augmenting hovering stability in small-size autonomous helicopters. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 70(1-4), 509-525.

[4] Sandino, L. A., Bejar, M., Kondak, K., & Ollero, A. (2014). Advances in Modeling and Control of Tethered Unmanned Helicopters to Enhance Hovering Performance. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 73(1-4), 3-18.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Seguimiento de referencia en la guiñada ante perturbación longitudinal en la dirección $\mathbf{n_1}$.

(b) Seguimiento de referencia en la guiñada ante perturbación lateral en la dirección $\mathbf{n_2}$.

Figura 12: Simulaciones. En rojo el helicóptero libre, en verde el helicóptero con el cable y en azul la referencia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

AJUSTE DE CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS POR CUANTIFICACIÓN Y CRUCE DE NIVELES

Julio Ariel Romero*, Roberto Sanchis, Ignacio Peñarrocha
Dep. Enginyeria de Sistemes Industrials i Disseny
Universitat Jaume I, Campus de Riu Sec, Castelló
* romeroj@uji.es

Resumen

En este artículo se proponen reglas para el ajuste de controladores PID basados en eventos generados mediante cuantificación regular y mediante cruce de niveles simétricos. Para cada uno de estos mecanismos de generación de eventos se proponen reglas de ajuste para los controladores con el fin de evitar la presencia de oscilaciones por ciclo límite. El estudio se basa en la función descriptiva y los resultados son aplicables a procesos con respuesta dinámica de distinta naturaleza: con retardos de tiempo, de fase no mínima, respuesta sub-amortiguada, etc. Las reglas que se presentan están dadas en términos del margen del fase y margen de ganancia, que son medidas de la robustez usadas en el diseño de controladores PID continuos. Esto permite aplicar los métodos de ajuste de controladores continuos al caso de PID basados en eventos. Las regla son extremadamente simples de aplicar y pueden usarse en el ajuste de PID, PI, PD u otras estructuras de controladores.

Palabras clave: PID, control basado en eventos, cuantificación, cruce de niveles simétricos

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años varios trabajos han sido publicados en los cuales se proponen algoritmos de control PID basados en eventos. Dichos trabajos se han desarrollados en el contexto de los sistemas de control en red, y en ellos se trata de aprovechar las conocidas bondades del control PID a la vez que se reduce el tráfico por la red de comunicaciones que interconecta las distintas unidades de *hardware* que forman el sistema de control: sensores, controladores, actuadores.

Una de las estrategias de generación de eventos más usada se basa en transmitir el valor de la señal sólo cuando esta cruce niveles o umbrales δ. Dicha estrategia se conoce como envío por cruce de niveles (SOD por sus siglas en inglés: *send on delta*) y su eficacia en cuanto al control y a la reducción de las comunicaciones ha sido ampliamente contrasta, [4, 7].

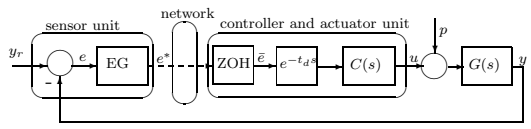
Una variante de la estrategia SOD aplicada al control PI ha sido propuesta en [1]. En ella se hace una cuantificación de la seña muestreada en cantidades que son múltiplo de un umbral δ, de forma que la relación entre la entrada y la salida del generador de eventos es simétrica con respecto al origen. Esta estrategia se conoce como envío por cruce de niveles simétricos (SSOD por sus siglas en inglés: *symmetric send on delta*). Algunos resultados importantes en el estudio de los controladores PI basados en SSOD han sido presentados recientemente en [1],[3]. En [2] se ha abordado el ajuste de controladores PI bajo una estrategia de muestreo SSOD para el control de sistemas de primer orden con retardo, de manera que los resultados obtenidos se limitan a este tipo de modelos.

En este artículo se estudia el efecto de introducir un esquema de muestreo basado en SSOD en un bucle de control PID. Para ello se utiliza la técnica de la función descriptiva, la cual permite predecir la existencia de ciclos límites que aparecen en este tipo de sistemas. A partir del estudio de la función descriptiva se obtienen las condiciones que debe cumplir el controlador para evitar los ciclos límites y por tanto las oscilaciones asociadas a ellos. El análisis también se realiza para el caso de una estrategia de muestreo basada en un cuantificador regular (RQ por sus siglas en inglés: *regular quantifier*). Para ambos casos se obtienen reglas de ajuste de los controladores las cuales están dadas en términos del margen del fase y margen de ganancia. El hecho de disponer de reglas que se basan en medidas de la robustez de sistemas continuos, como son los márgenes de ganancia y de fase, permite aplicar los métodos de ajuste que existen para los controladores continuos al caso de PID basados en eventos. Las reglas son extremadamente simples de aplicar y pueden ser usadas para el ajuste de controladores PID, PI o PD u otras estructuras de controladores.

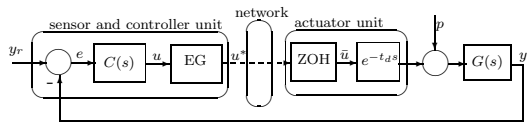
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Considere los sistemas de control en red mostrados en la Figura 1 donde $C(s)$ and $G(s)$ son las funciones de transferencia del controlador y del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Esquema *event-*$C(s)$



(b) Esquema $C(s)$-*event*

Figura 1: Sistema de control en red con generador de eventos.

proceso respectivamente, el bloque GE representa el generador de eventos y el bloque ZOH un retenedor de orden zero. Además y_r es la referencia, y es la salida controlada y p es una entrada de perturbación.

Estos dos esquemas de control fueron propuestos en [1] considerando que $C(s)$ es un controlador PI y que el generador de eventos se basa en SSOD. Por ello los autores le llamaron arquitecturas SSOD-PI y PI-SSOD. Este trabajo no se limita el estudio a los controladores PI ni al mecanismo SSOD, por lo que hemos rebautizado estas arquitecturas como *EG-*$C(s)$ y $C(s)$-*EG* respectivamente.

En el esquema presentado en la Figura 1(a) se asume que el controlador está localizado cerca del actuador y que el sensor envía medidas e^* del error $e = y_r - y$ al controlador a través de una red de comunicaciones. El envío se realiza mediante el bloque generador de eventos (EG). El bloque ZOH mantiene en $\bar{e}$ el último valor de e^* hasta que un nuevo valor sea enviado. Por otro lado el esquema mostrado en la Figura 1(b) asume que el sensor y el controlador está en la misma unidad y la comunicación entre el controlador y el actuador se realiza mediante una red de comunicaciones. En este caso el envío de nuevas acciones de control u^* al actuador se realiza mediante el bloque generador de eventos (EG). El ZOH en el actuador mantiene en $\bar{u}$ el valor de la última acción de control enviada hasta que un nuevo valor sea enviado.

Respecto al comportamiento de la red de comunicaciones se asume que el retardo en la transmisión es despreciable o conocido y constante con valor t_d. Este retardo es representado por el término $e^{-t_d s}$ a la derecha de los bloques ZOH en la Figura 1. Esta consideración se basa en que actualmente existen protocolos que reducen de forma significativa la colisión entre paquetes, causas fundamental de los retardos variable en la redes de comunicaciones, [6].

Bajo la suposición de que los retardos en la red son despreciables o conocidos y constantes los dos esquemas de control en la Figura 1 pueden ser representados como se muestra en la Figura 2. Aquí el bloque EG-ZOH representa la combinación de los bloques EG y ZOH de la Figura 1, mientras que $G_{ol}(s)$ es la función de transferencia de bucle abierto que corresponde a la parte lineal, o sea:

$$G_{ol}(s) = C(s)G(s)e^{-t_d s} \tag{1}$$

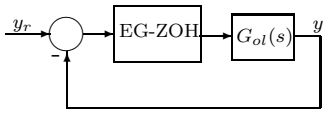


Figura 2: Sistema equivalente a los mostrados en la Figura 1.

El comportamiento del sistema de control representado en la Figura 2 para una $G(s)$ conocida, depende tanto del generado de eventos como del ajuste de controlador $C(s)$. En las siguientes secciones veremos en qué medida afecta cada uno de estos elementos el desempeño global del sistemas.

3. ANÁLISIS DEL GENERADOR DE EVENTOS

Como se ha comentado antes, uno de los objetivos de este trabajo es analizar el efecto de usar dos tipos de generadores de eventos diferentes: basado en SSOD y en RQ. En esta sección veremos cual es la consecuencia de usar cada una de estas estrategias de cara al ajuste del controlador $C(s)$. El análisis se basa en el uso de la función descriptiva.

3.1. GENERADOR DE EVENTOS BASADO EN SSOD

La característica de entrada/salida del generado de eventos basado en SSOD se muestra en la Figura 3. Los círculos pequeños representan los valores x^* enviados al ZOH. Un nuevo valor $x^* = i\delta$, $i \in \mathbb{Z}$ es enviado cuando x cruza los niveles $i\delta$. Las líneas gruesas horizontales sobre los círculos resaltan el hecho de que $\bar{x}$ mantiene su valor para variaciones de $\pm\delta$ alrededor de los niveles $i\delta$. La ecuación (2) describe este comportamiento.

$$\bar{x}(t) = \begin{cases} (i+1)\delta & \text{si } \bar{x}(t^-) = i\delta \,\&\, x(t) \geq (i+1)\delta \\ (i-1)\delta & \text{si } \bar{x}(t^-) = i\delta \,\&\, x(t) \leq (i-1)\delta \\ i\delta & \text{if } x(t) \in [(i-1)\delta, (i+1)\delta] \end{cases} \tag{2}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

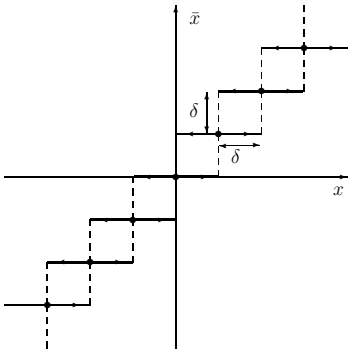


Figura 3: Característica de entrada/salida del bloque EG-ZOH basado en SSOD.

3.2. GENERADOR DE EVENTOS BASADO EN RQ

La característica de entrada/salida del generador de eventos basado en RQ se muestra en la Figura 4. Los círculos pequeños representan los valores x^* enviados al ZOH. Un nuevo valor $x^* = i\delta$, $i \in \mathbb{Z}$ es enviado cuando x cruza los niveles $\frac{(2i-1)}{2}\delta$. Las líneas gruesas horizontales sobre los círculos resaltan el hecho de que $\bar{x}$ mantiene su valor $i\delta$ si $x(t) \in [\frac{2i-1}{2}\delta, \frac{2i+1}{2}\delta]$. La ecuación (3) describe este comportamiento.

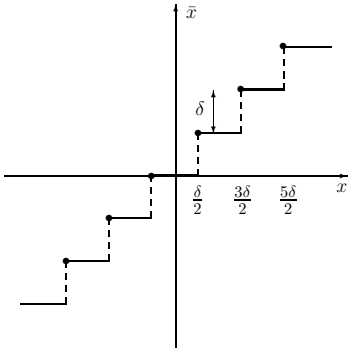


Figura 4: Característica de entrada/salida del bloque EG-ZOH basado en RQ.

$$\bar{x}(t) = \begin{cases} (i+1)\delta & \text{if } \bar{x}(t^-) = i\delta \,\&\, x(t) \geq \frac{2i+1}{2}\delta \\ (i-1)\delta & \text{if } \bar{x}(t^-) = i\delta \,\&\, x(t) \leq \frac{2i-1}{2}\delta \\ i\delta & \text{if } x(t) \in [\frac{2i-1}{2}\delta, \frac{2i+1}{2}\delta] \end{cases} \tag{3}$$

3.3. FUNCIONES DESCRIPTIVAS

La cuantificación regular descrita por la ecuación (3) ha sido ampliamente estudiada en la literatura. En [5] se obtuvo su función descriptiva, la cual viene dada por la ecuación (4) para una entrada sinusoidal de amplitud A tal que $\frac{2m-1}{2}\delta \leq A \leq \frac{2m+1}{2}\delta$.

$$N_q = \frac{4\delta}{\pi A}\sum_{k=1}^{m}\sqrt{1-\left(\frac{(2k-1)}{2}\frac{\delta}{A}\right)^2} \tag{4}$$

Respecto a la estrategia SSOD, esta no ha sido estudiada usando el método de la función descriptiva, al menos en conocimiento del autor. Siguiendo [5] se puede demostrar que ésta viene dada por la ecuación (5), para una entrada sinusoidal cuya amplitud A sea tal que $m = \lfloor \frac{A}{\delta} \rfloor$. En dicha ecuación $j = \sqrt{-1}$.

$$\begin{aligned} N_s = \frac{2\delta}{\pi A}\Bigg[1 + \sqrt{1-\left(m\frac{\delta}{A}\right)^2} \\ +2\sum_{k=1}^{m-1}\sqrt{1-\left(k\frac{\delta}{A}\right)^2}\Bigg] - jm\frac{2\delta^2}{\pi A^2} \end{aligned} \tag{5}$$

Como se puede ver, las dos funciones descriptivas dependen del cociente $\frac{\delta}{A}$. En la Figura 3 se puede comprobar que en el caso del SSOD la salida es cero para $A < \delta$. Por lo tanto sólo tiene sentido evaluar la función descriptiva (5) para $\frac{\delta}{A} \in [0, 1]$. Haciendo el mismo análisis para la quantización, Figura 4, se ve que para $A < \delta/2$ la salida es nula, por lo que sólo tiene sentido evaluar la función descriptiva dada por la ecuación (4) para $\frac{\delta}{A} \in [0, 2]$.

En las Figuras 5 y 6 se muestran las gráficas de las funciones descriptivas N_q y N_s en función de $\frac{\delta}{A}$. Una característica similar de ambas gráficas es que cuando $\frac{\delta}{A} \to 0$ se tiene que $\mathrm{Re}(N) \to 1$ y $\mathrm{Im}(N) \to 0$. O sea, que para valores infinitesimales de δ ambos generadores de eventos se comportan como ganancias unitarias.

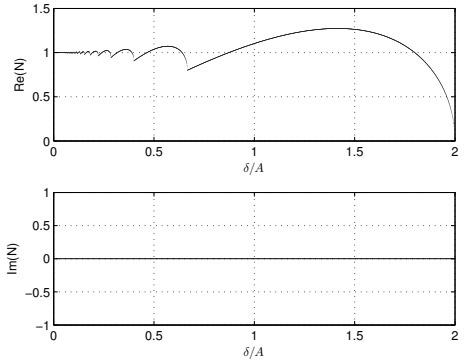


Figura 5: Repredentación gráfica de N_q en función de $\frac{\delta}{A}$.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

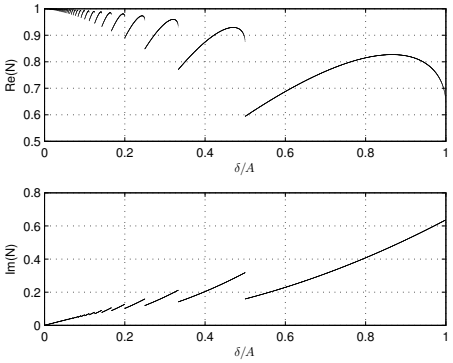


Figura 6: Repredentación gráfica de N_s en función de $\frac{\delta}{A}$

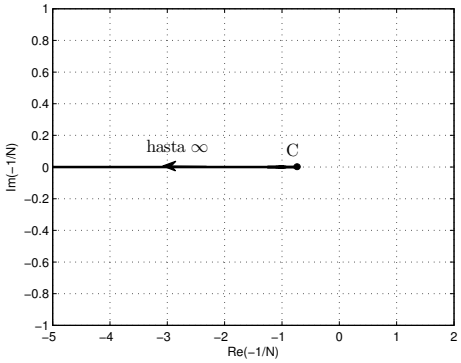


Figura 7: Gráfica de $-\frac{1}{N_q}$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

En esta sección se analiza el diseño del controlador $C(s)$ bajo las dos estrategias de generación de eventos descritas en la sección anterior. Consideraremos que $C(s)$ es un controlador PID por ser este el de uso más extendido, aunque el análisis se puede aplicar otras estructuras de controladores.

El análisis se basa en el uso de las funciones descriptivas N_q y N_s para los generadores de eventos basados en RQ y en SSOD. Estas funciones descriptivas pueden ser usadas para analizar la existencia de ciclos límites en el sistema de la Figura 2.

La condición de existencia de ciclos límites es dada por la ecuación (6), la cual corresponde a la intersección de $G_{ol}(j\omega)$ y $-1/N$, donde N se refiere tanto a N_q como a N_s. El término de la derecha depende del cociente $\frac{\delta}{A}$, por tanto, la forma de $-\frac{1}{N_q}$ y $-\frac{1}{N_s}$ es independiente del valor de δ que se considere en los generadores de eventos. Esto quiere decir que la no existencia de intersecciones se debe garantizar mediante el término de la izquierda, en concreto mediante el ajuste del controlador $C(j\omega)$.

$$G_{ol}(j\omega) = -\frac{1}{N} \tag{6}$$

En la Figura 7 se muestra la gráfica de $-\frac{1}{N_q}$. Se trata de una curva sobre el eje real cuyo valor máximo es -0.78, representado en la gráfica por el punto C. Por la izquierda la curva tiende hacia $-\infty$, extremo que se consigue cuando $\frac{\delta}{A} \to 2$

La Figura 8 muestra la gráfica de $-\frac{1}{N_s}$. La curva es significativamente diferente al caso RQ. Está formada por varias ramas, cada una de las cuales se obtiene para un valor de $m = \left\lfloor \frac{A}{\delta} \right\rfloor$. Se puede apreciar que el valor máximo de la curva sobre el eje real es el punto (-1,0), el cual se obtiene cuando $\frac{\delta}{A} \to 0$. Al igual que para el caso RQ, el valor real máximo de la curva es -0.78, que para el caso SSOD se corresponde con un valor imaginario también de -0.78, representado en la gráfica por el punto C.

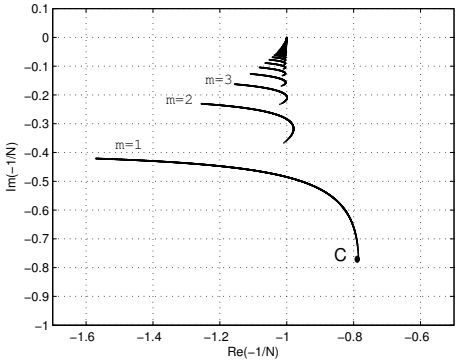


Figura 8: Gráfica de $-\frac{1}{N_s}$

Para las dos estrategias de generación de eventos se establecerán criterios de robustez que permitirán ajustar el controlador $C(s)$ para evitar los ciclos límites y garantizar la estabilidad del sistema de control.

4.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EG BASADO EN RQ

De acuerdo con la forma de la gráfica de $-\frac{1}{N_q}$ en la Figura 7, para evitar la presencia del ciclos límites cuando se usa un generador de eventos basado en RQ, basta con que el controlador $C(s)$ se diseñe de forma tal que garantice un margen de ganancia γ_d que cumpla la siguiente restricción:

$$\gamma_d > 1/0{,}78 = 1{,}28 \tag{7}$$

Esto se muestra en la Figura 9, donde se presentan los resultados de un diseño con margen de ganancia de 2 y se puede comprobar que no se produce intersección entre $G_{ol}(j\omega)$ y $-\frac{1}{N_q}$.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

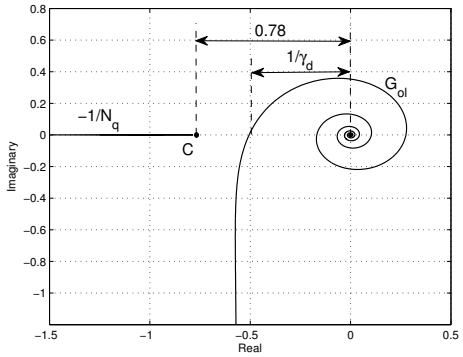


Figura 9: Restricción del margen de ganancia γ_d para el caso de generador de eventos basado en RQ.

4.2. DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA EG BASADO EN SSOD

En el caso del generador de eventos basado en SSOD, no se tienen restricciones adicionales en cuanto al margen de ganancia a las de un controlador continuo, pues el valor máximo de la curva $-\frac{1}{N_s}$ sobre el eje real es -1.

Como se ha comentado anteriormente, el punto C representa el máximo valor real y el mínimo valor imaginario de la curva $-\frac{1}{N_s}$, cuya gráfica está a la izquierda y fuera del círculo de radio unidad, como se puede ver en la Figura 10. El punto C tiene coordenadas $(-0{,}78, -0{,}78)$, que se corresponde con un módulo de 1,1, prácticamente sobre el círculo de radio unidad, y un argumento de 45^o. Teniendo en cuenta esto, una forma simple de evitar la intersección entre $G_{ol}(j\omega)$ y $-\frac{1}{N_s}$ es garantizar mediante el diseño de $C(s)$ un margen de fase ϕ_d que cumpla la siguiente restricción:

$$\phi_d > 45^o \tag{8}$$

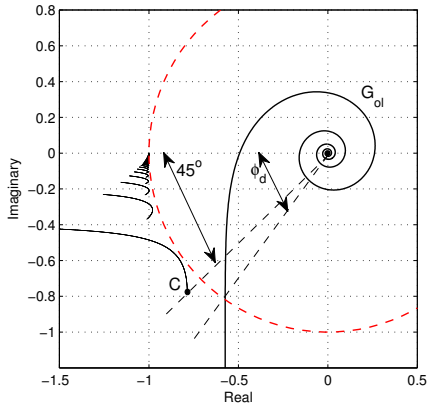


Figura 10: Restricción del margen de fase ϕ_d para el caso de generador de eventos basado en SSOD.

Observación 1 *En general, para el ajuste de controladores PID se consideran como razonables márgenes de ganancia de 2 o superior y margen de fase entre* 50^o *y* 60^o*. Por lo tanto, las restricciones que se deben tener en cuenta para evitar la aparición de ciclos límites cuando se usan generadores de eventos basados en RQ o en SSOD se cumplen de forma implícita en muchos métodos de ajuste.*

5. EJEMPLOS

En esta sección realizaremos varios ejemplos de ajustes de PID en los que usaremos valores de γ_d y ϕ_d alejados de los valores recomendables en la práctica con el objetivo de ilustras los resultados presentados en la sección anterior. Para el ajuste de los controladores usaremos el método presentado en [8], el cual se basa en maximizar la ganancia integral que es aproximadamente equivalente a minimizar el IAE, garantizando un valor de margen de fase deseado y un margen de ganancia igual o superior a un valor dado.

Para los ejemplo se han considerado dos sistemas con funciones de transferencia $G_1(s)$ y $G_2(s)$, ecuación (9), para los cuales se realizaron 4 diseños de controladores PID con diferentes valores de márgenes de fase y ganancia. Los valores usados en cada caso aparecen en la Tabla 1, donde además se resumen las Figuras que presentan los resultados en cada caso. En las Figuras 11, 13, 15 y 17 se muestran las gráficas de $-\frac{1}{N_s}$ y $-\frac{1}{N_q}$ junto a la G_{ol} que se consigue con el ajuste del PID para cada diseño. Las Figuras 12, 14, 16 y 18 muestran las respuestas temporales de la salida del sistema controlado ante cambios en la referencia y perturbación cuando el generador de eventos se basa en la RQ (gráfica superior) y en SSOD (gráfica inferior). Además se muestran los eventos generados en cada caso. En todos los ejemplos de ha usado $\delta = 1$.

$$G_1(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \qquad G_2(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^4} \tag{9}$$

Cuadro 1: Parámetros usados en los diseños de los controladores PID .

Diseño	Sistema	γ_d	ϕ_d	Resultados
1	$G_1(s)$	≥ 2	55^o	Figs. 11, 12
2	$G_1(s)$	≥ 2	35^o	Figs. 13, 14
3	$G_2(s)$	≥ 2	55^o	Figs. 15, 16
4	$G_2(s)$	$\leq 1{,}28$	60^o	Figs. 17, 18

Como se puede ver en la Tabla 1, los diseños 1 y 3 cumplen las restricciones dadas por la ecuaciones (7) y (8), por tanto el sistema no presenta ciclos límites, independiente del generador de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

eventos usado. Esto se puede ver en las Figuras 11 y 15 donde se aprecia que la función de transferencia de bucle abierto G_{ol} no intercepta a $-\frac{1}{N_s}$ ni a $-\frac{1}{N_q}$, por tanto no aparecen ciclos límites en la respuesta temporal del sistema, Figuras 12 y 16.

El diseño 2 no cumplen la restricción del margen de fase, ecuación (8), produciéndose por tanto la intersección entre G_{ol} y $-\frac{1}{N_s}$, como se ve en la Figura 13. Para este diseño aparecen ciclos límites cuando se usa un generador de eventos basado en SSOD, mientras que esto no ocurre cuando el generador de eventos de basa en RQ, como se corrobora en la Figura 14, donde se aprecian las oscilaciones para el generador de eventos basado en SSOD.

Finalmente, en el diseño 4, no se cumple la restricción del margen de ganancia, ecuación (7). En consecuencia G_{ol} y $-\frac{1}{N_q}$ se interceptan, Figura 17, provocando la aparición de un ciclo límite en caso de usar un generador de eventos basado en RQ, cuyas oscilaciones se pueden ver en la Figura 18. Al cumplirse la restricción de fase en este diseño, ecuación (8), no aparecen oscilaciones para un generador de eventos basado en SSOD.

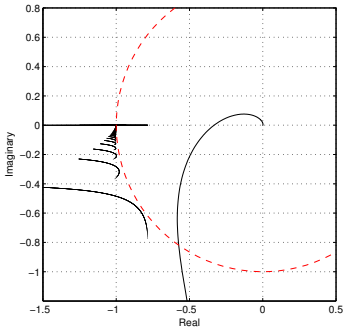


Figura 11: Gráficas de $\frac{1}{N_d}$, $\frac{1}{N_s}$ y G_{ol} para el PID diseñado para $G_1(s)$ con $\phi_d = 55^0$ y $\gamma > 2$.

6. EFECTO DEL PARÁMETRO δ

Las funciones descriptivas N_q y N_s, ecuaciones (4) y (5), dependen del cociente $\frac{\delta}{A}$ y en ellas no aparece ningún término que dependa sólo de δ. Esto significa que tanto N_q como N_s tienen expresiones normalizadas e independientes del valor de δ y que en consecuencia la forma de la gráficas de $-\frac{1}{N_q}$ y $-\frac{1}{N_s}$ en las Figuras 7 y 8 no se ve afectada por el cambio en el valor de δ. Ello implica que una vez diseñado el controlador $C(s)$ para evitar las intersecciones entre $G_{ol}(j\omega)$ y $-\frac{1}{N_q}$ o $-\frac{1}{N_s}$, dicha condición se mantendrá independientemente del valor del parámetros δ que se fije en el generador de eventos. Por lo tanto, ni la estabilidad ni la robustez del sistema de control en la Figura 1 se verán afectados por δ.

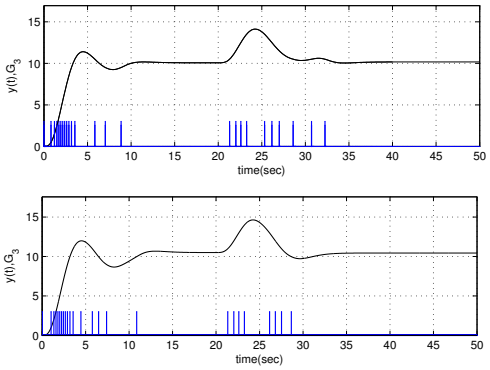


Figura 12: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_1(s)$ con $\phi_d = 55^0$ y $\gamma > 2$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior).

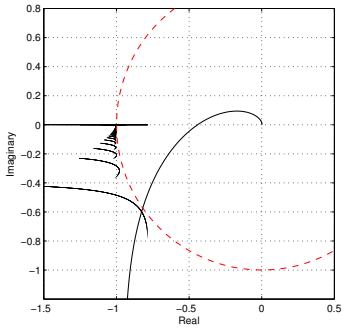


Figura 13: Gráficas de $\frac{1}{N_d}$, $\frac{1}{N_s}$ y G_{ol} para el PID diseñado para $G_1(s)$ con $\phi_d = 35^0$ y $\gamma > 2$.

El valor de δ si influye, no obstante en el error en estado de estado estable debido a que tanto el generador de eventos basado en RQ como en SSOD introducen un efecto de zona muerta. Resulta evidente que a mayor δ mayor será dicho error. Así mismo el valore de δ está directamente relacionado con la cantidad de eventos generados en cada una de estrategias: a mayor δ menor número de eventos y viceversa. Teniendo en cuenta esto la selección de δ debe responder a un compromiso entre la precisión deseada en el control y el número de eventos generados

Observación 2 *Ante la ausencia de ciclos límites, la influencia del valor del parámetro δ en el generador de eventos se limita al error en estado estable, y no tiene incidencia en la estabilidad ni en la robustez del sistema de control en bucle cerrado.*

Para ilustrar lo anterior consideremos el sistema con función de transferencia $G_3(s)$, ecuación (10), para el cual se diseña un controlador PID con

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

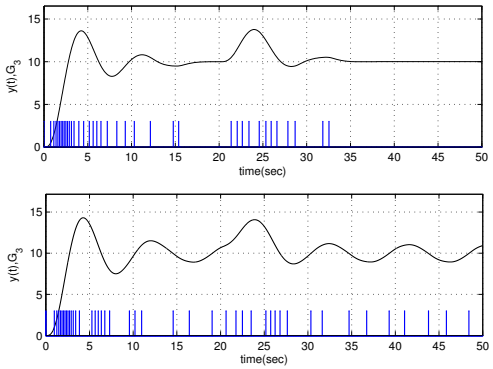


Figura 14: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_1(s)$ con $\phi_d = 35^0$ y $\gamma > 2$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior).

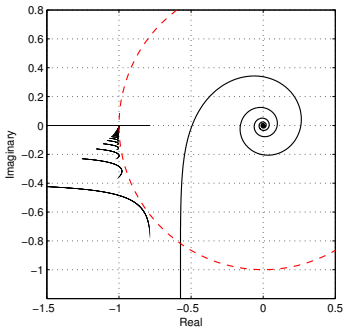


Figura 15: Gráficas de $\frac{1}{N_d}$, $\frac{1}{N_s}$ y G_{ol} para el PID diseñado para $G_2(s)$ con $\phi_d = 55^0$ y $\gamma > 2$.

$\phi = 60^o$ y $\gamma > 2$, de manera que el diseño no presenta ciclos límites ni para un generador de eventos basado en RQ ni en SSOD.

$$G_3(s)\frac{9}{(s+1)(s^2+2s+9)} \qquad (10)$$

Las Figuras 19 y 20 nuestras las simulaciones con $\delta = 1$ y $\delta = 2$ respectivamente. Se ha incluido además la respuesta cuando se usa un controlador continuo, o sea sin usar generadores de eventos. Se puede comprobar que el incremento de δ implicar un aumento del error en estado estable pero una reducción en el número de eventos generados. Para $\delta = 1$ la respuesta de los controladores basados en eventos y del controlador continuo son más perecidas. A medida que la δ se reduce esta similitud se incrementa a costa de un incremento del número de eventos generados.

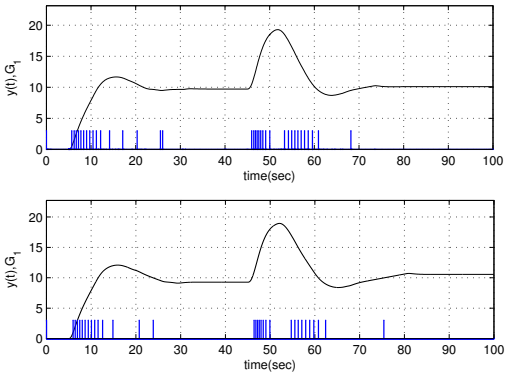


Figura 16: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_2(s)$ con $\phi_d = 55^0$ y $\gamma > 2$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior).

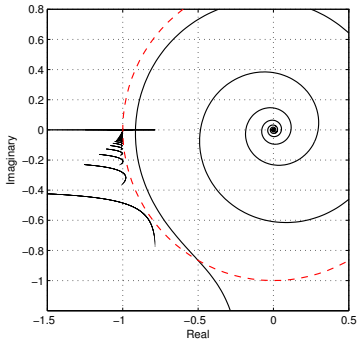


Figura 17: Gráficas de $\frac{1}{N_d}$, $\frac{1}{N_s}$ y G_{ol} para el PID diseñado para $G_2(s)$ con $\phi_d = 60^0$ y $\gamma < 1{,}28$.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado reglas de diseño de controladores para sistemas de control en red en los que se usan generadores de eventos para reducir el envío de datos por la red de comunicaciones. Se han estudiado dos mecanismos de generación de eventos: uno basado en cuantificación regular (RQ), y otro basado en cruce de niveles simétricos (SSOD).

Las reglas se dan en términos de restricciones a medidas de la robustez de los sistemas de control continuo como son el margen de ganancia para el caso RQ y del margen de fase para el caso SSOD. Las reglas permiten usar los métodos disponibles para el ajuste de controladores PID continuos al caso de los sistemas de control basados en eventos.

Se demuestra, además, que la estabilidad y robustez del sistema de control se garantiza con un ajuste adecuado del controlador y es totalmente independiente del parámetro δ del generador de eventos tanto para el caso RQ como SSOD.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

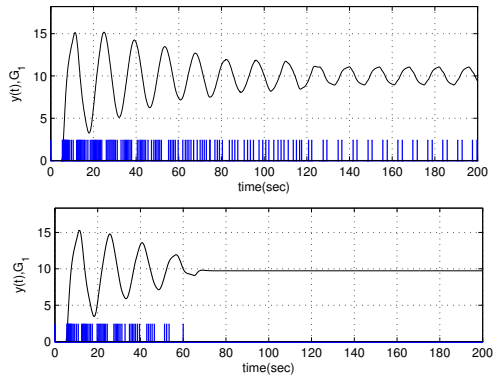


Figura 18: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_1(s)$ con $\phi_d = 60^0$ y $\gamma < 1{,}28$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior).

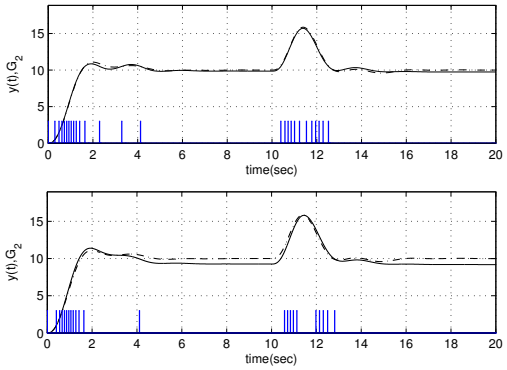


Figura 19: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_3(s)$ con $\phi_d = 60^0$ y $\gamma > 2$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior). $\delta = 1$.

Los resultados han sido verificados por simulación. Se han considerado procesos con diferentes tipos de respuestas dinámicas, incluyendo polos complejos y retardos de tiempo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto DPI2011-27845-C02-02 del MICINN.

Referencias

[1] Manuel Beschi, Sebastián Dormido, José Sanchez, and Antonio Visioli. Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers. *Journal of Process Control*, 22(10):1930–1945, December 2012.

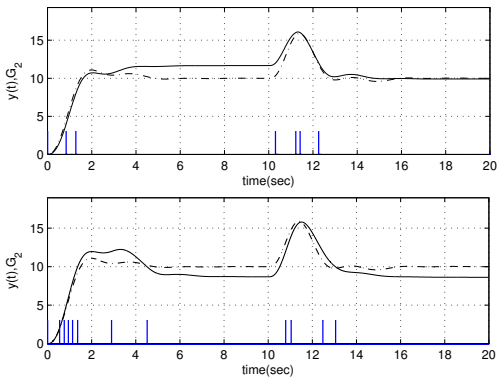


Figura 20: Comportamiento de la salida controlada y ante cambio en la referencia y_r y perturbación p para el PID diseñado para $G_3(s)$ con $\phi_d = 60^0$ y $\gamma > 2$ con generador de eventos basado en RQ (gráfica superior) y basado en SSOD (gráfica inferior). $\delta = 2$.

[2] Manuel Beschi and Antonio Visioli. Tuning of symmetric send-on-delta proportional-integral controllers. *IET Control Theory and Applications*, 8, 2013.

[3] Jesús Chacón, José Sánchez, Antonio Visioli, Luis Yebra, and Sebastián Dormido. Characterization of limit cycles for self-regulating and integral processes with PI control and send-on-delta sampling. *Journal of Process Control*, 23(6):826–838, 2013.

[4] S. Dormido, J. Sanchez, and E. Kofman. Muestreo, control y comunicacion basados en eventos. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial RIAI*, 5(1):5 – 26, 2008.

[5] A. Gelb and W. E. VanderVelde. *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design.* New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1968.

[6] A. Leva and F. Terraneo. Low power synchronisation in wireless sensor networks via simple feedback controllers: The flopsync scheme. In *American Control Conference (ACC), 2013*, pages 5017–5022, June 2013.

[7] J. Ploennigs, V. Vasyutynskyy, and K. Kabitzsch. Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 6(3):416 –424, aug. 2010.

[8] Roberto Sanchis, Julio A. Romero, and Pedro Balaguer. Tuning of pid controllers based on simplified single parameter optimisation. *International Journal of Control*, 83(9):1785–1798, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Entorno para Usuarios con Parálisis Cerebral

Miguel Velasco, Alejandro Clemotte
miguel.velasco@csic.es, a.clemotte@alumnos.upm.es

Rafael Raya, Ramón Ceres
rafael.raya@csic.es, ramon.ceres@csic.es

Resumen

En este artículo se describe el diseño e implementación de un sistema de control de entorno para usuarios con parálisis cerebral (PC). La plataforma trata de solventar las limitaciones de la domótica actual que, si bien ha demostrado ser una tecnología madura y muy extendida para la población general, apenas se aplica al mundo de la discapacidad. El sistema diseñado integra diversas interfaces de acceso alternativo al computador, ya sea por movimientos de la cabeza medidos a través de sensores inerciales, como el seguimiento de la mirada a través de sistemas de visión infrarrojos, con una interfaz gráfica sencilla y fácilmente usable en la que se ha llegado a un compromiso entre la cantidad de botones y el tamaño de los mismos. En la plataforma, usuarios con PC de ASPACE Cantabria han podido controlar un equipo de música, televisión, radio, y elementos de la habitación como persianas y climatizadores. El abaratamiento de esta tecnología permitirá que personas con trastornos motores severos ganen en autonomía e interacción con su entorno.

Palabras clave: parálisis cerebral, domótica, control del entorno, accesible, interacción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PARÁLISIS CEREBRAL

La parálisis cerebral (PC) es una de las discapacidades más severas en la infancia y supone una enorme carga tanto para los servicios sanitarios, educativos, sociales así como las familias y, por supuesto, el individuo. Parálisis cerebral es un término muy amplio que engloba una serie de trastornos permanentes no progresivos de diversa índole como consecuencia de lesiones del cerebro inmaduro producidas por traumatismos e hipoxias durante el parto o infecciones anteriores o posteriores al mismo. La PC se manifiesta principalmente en disfunciones neuromotoras con alteraciones en el control motor y postural debido a trastornos de la coordinación y del tono muscular pero también pueden afectar a la percepción, la memoria o el razonamiento [8]. La prevalencia de la PC es a nivel internacional de entre 1.5 y 2.8 casos por millar de nacimientos. Solamente en los Estados Unidos de América medio millón de niños están afectados. En Europa las cifras son similares e incluso superiores: el ratio global para el periodo entre 1980 y 1990 fue de 2.08 por cada 1000 nacimientos.

En cuanto a los diferentes cuadros y variantes de PC, el trabajo [1] presentó una clasificación en términos de nosología, topografía y función. La clasificación divide la PC en 3 tipos: espástica, atáxica y discinética. La PC espástica se caracteriza por al menos 2 de estos signos: patrón anómalo de la postura y/o el movimiento, tono muscular incrementado y reflejos patológicos. Puede ser unilateral o bilateral. La PC atáxica se caracteriza tanto por la presencia de un patrón motor y/o postural anormal como por la pérdida de la coordinación muscular; los movimientos se realizan con una fuerza, ritmo y precisión anómalos. La PC discinética, por su parte, se ve dominada por un trastorno motor y postural, y movimientos involuntarios incontrolados, recurrente y ocasionalmente estereotipados.

Es poco frecuente que la PC tenga únicamente manifestaciones de tipo motor, la mayoría de los pacientes presenta por lo menos una discapacidad asociada. La deficiencia mental es la deficiencia asociada más común, aproximadamente el 70% de los casos la presenta. En algunos casos la PC puede ser tan sutil que se manifieste solo como problemas de aprendizaje, visuales, de psicomotricidad y lenguaje, que suelen ser las manifestaciones más leves, e incluso pueden no relacionarse con la PC.

Se desprende de esta clasificación que el término "parálisis cerebral" se trata de un término "paraguas" que engloba una gran variedad de trastornos que tienen su origen como denominador común. Es por ello que existe una gran heterogeneidad entre los perfiles de discapacidad con los que trabajan psicólogos, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales y desarrolladores de tecnologías para la discapacidad.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

1.2 DOMÓTICA Y DISCAPACIDAD

Una investigación del Instituto Nacional de Estadística de España muestra que el 74% de la población española con discapacidad (2,8 millones) padece algún tipo de limitación para realizar actividades de la vida diaria (AVD), mientras que cerca de 1.390.000 no puede realizar ningún tipo de AVD en absoluto sin la ayuda de personal especializado (Instituto Nacional de Estadística, 2008). Este es, por ejemplo, el caso de las personas afectadas por parálisis cerebral severa.

La domótica adaptada podría mitigar las dificultades de las personas con discapacidad para llevar a cabo esas actividades, dando la oportunidad de manejar los aparatos electrónicos a través de un sistema especialmente diseñado. La domótica tiene que proporcionar interfaces de control específicas y adaptadas basadas en Comunicación Aumentativa y Alternativa con el fin de ser una solución eficaz al problema y permitir a los grupos con mayor grado de dependiencia alcanzar el máximo nivel de autonomía.

La instalación de un sistema domótico adaptado puede hacer la tecnología útil para aquellas personas con capacidades particulares, aumentando la autonomía del usuario y permitiendo realizar AVD en un ambiente privado. La apertura de una ventana, encender el televisor y cambiarlo al canal favorito, el establecimiento de la calefacción a 22 grados, encender la luz, abrir y cerrar la puerta o comprobar el estado de las alarmas son sólo algunos ejemplos de AVD que un sistema domótico adaptado tiene que ofrecer al usuario.

Machado [4], prueban el sistema Head Pilot, que utiliza un algoritmo robusto que mide en tiempo real el movimiento de la cabeza con una cámara web. Head Pilot pretende controlar cualquier interfaz informática y domótica a través del control del puntero de un ordenador. Este trabajo tiene como objetivo crear una tecnología de ayuda fácil de usar, una vez que se ha configurado. Los usuarios pueden ajustar la configuración del sistema para su mayor comodidad. Posada [10], presenta una interfaz basada en el sensor de Kinect para controlar algunas funciones en una habitación con un mecanismo de interacción natural. Uno de los objetivos de ese trabajo es el desarrollo de una aplicación domótica para ayudar a las personas con diferentes capacidades a ejecutar tareas específicas en un entorno gráfico amigable. Algunas de estas tareas son: encender/apagar una lámpara, cerrar/abrir las persianas, activar/desactivar el aire acondicionado, activar una alarma para pedir ayuda, etc.

Una interfaz cerebro-ordenador (brain-computer interface, BCI) es un sistema de comunicación que monitoriza la actividad del cerebro y traduce las características específicas de las señales que reflejan la intención del usuario en comandos que operan un dispositivo. El método más utilizado para el seguimiento de la actividad cerebral en sistemas BCI es la electroencefalografía (EEG). El registro del EEG es un método no invasivo que requiere un equipo relativamente simple y barato y es más fácil de usar que otros métodos, tales como la magnetoencefalografía (MEG) o la tomografía por emisión de positrones (PET). Alguna de las limitaciones de los sistemas BCI es que requieren altos niveles de entrenamiento y concentración. Además la respuesta del sistema es muy limitada, normalmente tipo binaria (sí/no). Para más detalles puede referirse a [5], se donde presenta una revisión de las BCI basadas en EEG para personas con discapacidad. Más concretamente el estudio de Corralejo [2][3] propone la implementación de una aplicación BCI para permitir que las personas con discapacidad puedan interactuar con los dispositivos presentes en su entorno habitual.

2 MOTIVACIÓN

El sistema domótico presentado surge dentro del marco de actividades del Proyecto IVANPACE como aplicación de los trabajos anteriores en relación al acceso alternativo al computador para personas con trastornos motores severos. La finalidad de IVANPACE es la elaboración de nuevas técnicas y herramientas tecnológicas de rehabilitación y compensación funcional de personas con PC y síndromes afines a partir de una colaboración estable y multidisciplinar que favorezca un mejor conocimiento de las deficiencias neuromotoras y la puesta a punto de productos o servicios específicos de apoyo. Son igualmente objeto de interés los sistemas que permitan potenciar la actividad humana y su relación con el medio, ya sea en el ámbito de la salud o en el de la autonomía de personas con discapacidad.

El mundo de la domótica tiene un largo recorrido y está su tecnología muy desarrollada tanto desde el punto de vista de hardware como de software. Sin embargo, se ha detectado que su uso en el mundo de la discapacidad y, de manera especial, de la parálisis cerebral es muy reducido debido a las grandes limitaciones que este tipo de usuarios tienen para manejar la tecnología y acceder a los diferentes interfaces de control. Estas interfaces suelen estar por lo general, salvo alguna expeción como las mencionadas en el apartado anterior, diseñadas para usuarios con plenas capacidades

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

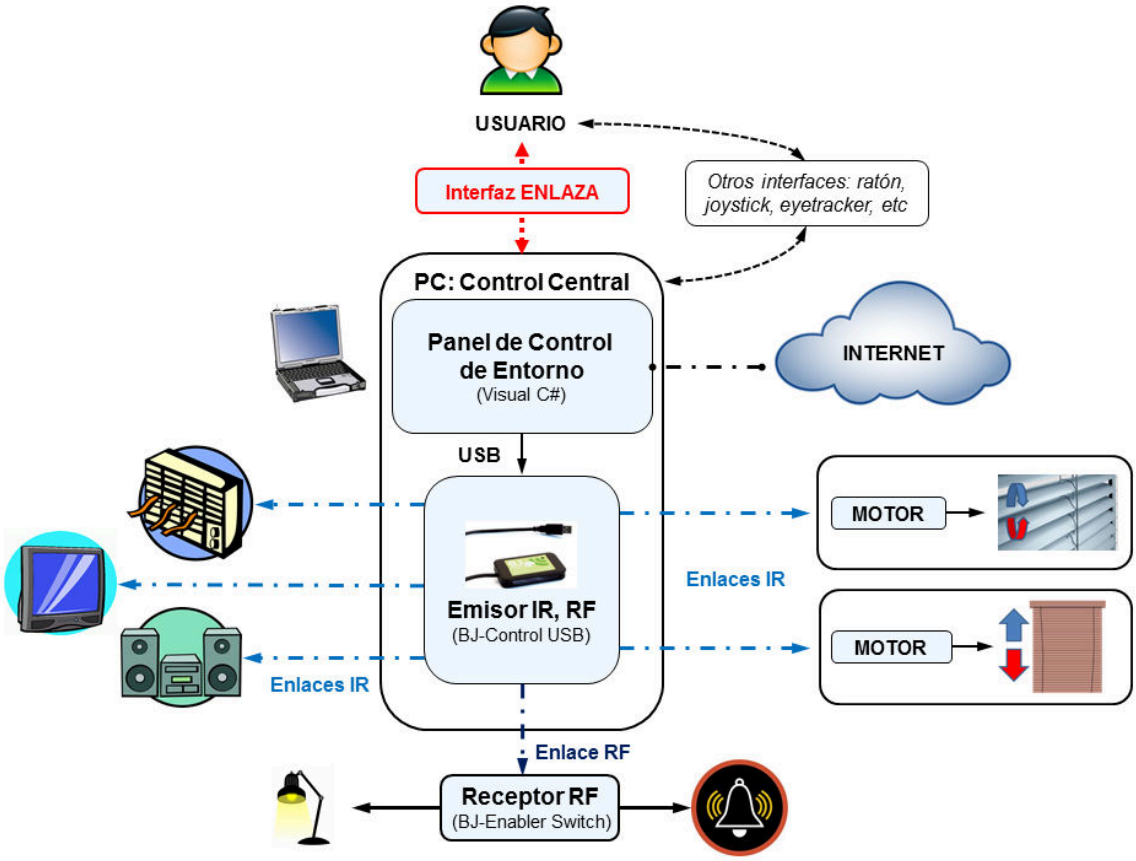


Figura 1: Elementos y canales de comunicación del control de entorno

motoras. Para solventar dichas dificultades de acceso a la tecnología, se presenta una plataforma universal que combina diversas interfaces de acceso alternativo al computador que se ajustan a los diversos grados de trastorno motor, un entorno gráfico sencillo y usable en el usuario pueda interactuar intuitivamente con todos los dispositivos de la plataforma.

3 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

En las siguientes secciones se hace una descripción detallada de los elementos integrantes del sistema de control de entorno: electrodomésticos y elementos del hogar motorizados, elementos actuadores (receptores y emisores de señales de infrarrojos y radiofrecuencia) y el interfaz multiacceso de manejo del sistema (mostrado en Figura 1).

3.1 ELEMENTOS CONTROLADOS

En consenso con terapeutas y cuidadores de ASPACE Cantabria se decidió estudiar la implantación del sistema completo en la sala de estar de la residencia de esta Entidad, proponiendo los siguientes dispositivos del entorno a controlar:

- Por canal de infrarrojos (elementos de la sala dotados de mando de control remoto por IR)
  - Televisor: encendido/apagado, selección de canal, volumen y silencio
  - Equipo de música: encendido/apagado, reproducción, pausa, pasar a la canción anterior/siguiente, volumen y silencio
  - Aire acondicionado: encendido/apagado y ajuste de la temperatura
  - Estor: subida y bajada
  - Persiana veneciana: subida, bajada, y apertura y cierre de las lamas
- Por canal de radiofrecuencia (elemento situado en alguna habitación próxima conectado al receptor RF)
  - Accionamiento de una alarma para petición de ayuda
- Por medio del computador, acceso a radio y otros contenidos en Internet.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 2: Elementos receptores y emisores comerciales

Figura 3: Adaptación del receptor de RF para el control dde la alarma sonora remota de llamada al cuidador

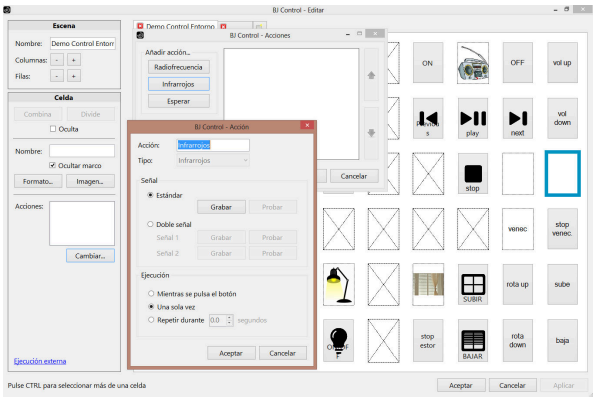


Figura 4: Software BJ Control de comunicación con los receptores/actuadores comerciales

3.2 ELEMENTOS EMISORES Y RECEPTORES

El control de entorno planteado utiliza una estructura centralizada de emisor único y diversos receptores pasivos que permanecen ininterrumpidamente a la escucha. El emisor se comunica con los receptores con enlaces inalámbricos de dos tipos: infrarrojos (39 KHz) y radiofrecuencia en la banda ICM (433 MHz). Acompaña al emisor un software específico que permite el registro de códigos de aquellos controles remotos que sean enfrentados al emisor. De esta manera, se puede construir un enlace de IR con cualquier dispositivo que disponga de control remoto. Para la utilización de enlaces RF se necesita incorporar al sistema un receptor de radiofrecuencia adicional que actuará como conmutador ON/OFF para el encendido o apagado de un tercer dispositivo. Véase la Figura 2. Todos estos elementos—emisor, receptores de RF y software de control—se han adquirido de la empresa BJ Adaptaciones S.L. El control central del sistema se puede hacer desde un computador mediante el software BJ Control, que trabajará en segundo plano y de manera totalmente transparente para el usuario (Figura 4).

Cabe destacar que en el caso de los canales IR utilizados, los controles remotos originales no quedan inhabilitados sino que pueden ser utilizados de manera simultánea por familiares o cuidadores de ASPACE. Asimismo, se ha modificado el receptor de RF de manera que pueda ser utilizado con dispositivos de mayor potencia como calefactores eléctricos, lo cuales recibirán la alimentación del propio receptor en función de los comandos que lleguen desde el control central. El nuevo elemento incluye además la posibilidad de lanzar una alarma sonora que sólo se desactivará cuando el cuidador atienda la llamada (mostrada en la Figura 3).

La comunicación entre emisores y receptores para los dos tipos de enlace en términos de directividad o longitud máxima de enlace ha sido testada en laboratorio con resultados satisfactorios para el entorno de trabajo definido.

3.3 INTERFAZ DE CONTROL

3.3.1 Interfaz gráfica

Se ha diseñado un software en Visual Studio 2010 y en el lenguaje de programación C# compatible con el software de control del emisor de IR/RF. La interfaz creada (ver Figura 5) permite al usuario acceder a los distintos dispositivos de una manera sencilla e intuitiva, y está adaptada a sus capacidades cognitivas y motoras. Es por ello que es accesible con el ratón convencional o, como veremos más adelante, sistemas apuntadores basados en sensores inerciales como ENLAZA o *eyetrackers* como Iriscom o Tobii. La interfaz proporciona además una realimentación visual y sonora para cualquier acción ejecutada por el usuario.

Se ha buscado realizar un diseño amigable que maximice la usabilidad para personas con

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 5: Ejemplos de pantallas del control de entorno

trastornos visuales. Todas las pantallas tienen una cantidad reducida de botones, éstos tienen buen contraste con el fondo y están agrupados por un código de colores: rojo para el sistema de alarma remota, naranja para los elementos relacionados con el ocio (TV, música, contenidos en Internet) y verde para los elementos de control del ambiente: aire acondicionado, persianas. El color amarillo está reservado para los botones relacionados con la propia interfaz: retorno a la pantalla previa y bloqueo de la pantalla. Ver Figura 5, en su parte inferior derecha.

Por otro lado, la estructuración de los botones en las diferentes ventanas—en las cuales en ningún caso 2 botones de pantallas consecutivas se encuentran localizados en la misma posición—se ha realizado para evitar que un usuario realice un clic erróneo al pasar a la nueva pantalla tras hacer clic en la pantalla inicial.

3.3.2 Interfaces de acceso alternativo

Como se ha comentado anteriormente se pretende que el acceso al sistema sea universal, independientemente de la solución de acceso alternativo al computador elegida por el usuario. Con ese fin, se ha realizado una integración del sistema con interfaces alternativos como son ENLAZA e IRISCOM (mostrados en la Figura 6).

La interfaz ENLAZA es un sistema apuntador de acceso al computador por movimientos de cabeza que ha sido desarrollado por el Grupo de Bioingeniería del CSIC en colaboración con ASPACE Cantabria y la empresa Technaid S.L. basado en

Figura 6: Sistemas de acceso alternativo al computador: ENLAZA e IRISCOM

sensores inerciales o IMUs [7]. Un sensor inercial es un dispositivo que, por medio de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros tridimensionales, es capaz de medir movimientos. ENLAZA consta de un IMU a situar en la cabeza del usuario que estima la orientación de ésta a partir de la aceleración y el campo magnético medidos y la traduce a una posición del cursor en pantalla. El movimiento involuntario de la cabeza, que naturalmente se extiende a la trayectoria tomaría el cursor en la pantalla es filtrado con la ayuda de un filtro de adaptativo [6]. El filtro trata de discernir entre las componentes voluntarias e involuntarias del movimiento, reduciendo considerablemente estas últimas y suavizando así la trayectoria del cursor, lo que facilita en gran medida la interacción del usuario con el computador

Palomo y otros [9] han desarrollado IRISCOM el cual es un dispositivo, diseñado para personas con alta limitación en su funcionalidad motriz, que permite el control de un ordenador PC mediante el movimiento de los ojos. Se trata de un disposi-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 7: Usuario con parálisis cerebral durante una sesión de prueba del sistema de control de entorno en la sede de ASPACE Cantabria. El acceso al computador se realiza mediante la interfaz ENLAZA

tivo que reemplaza al ratón manual, posibilitando que las personas que no pueden manejar el ratón con las manos, consigan prácticamente los mismos resultados mirando simplemente al lugar deseado.

4 PRUEBAS REALIZADAS

La plataforma al completo ha sido probada *in situ* con usuarios de ASPACE Cantabria con resultados muy prometedores. Aquellos usuarios que en su vida diaria usaban sistemas de rastreo de la mirada para acceder al ordenador accedieron al interfaz gráfico por medio de Iriscom, mientras aquellos cuyos perfiles de trastorno motor no hacian posible el uso de esta tecnología, interactuaron con el sistema mediante ENLAZA y su sistema de filtrado de los movimientos involuntarios (ver Figura 7).

La respuesta de los usuarios fue en general buena. Como propuestas para la mejora continuada del sistema se plantea flexibilizar el diseño de manera que tanto usuarios como terapeutas puedan personalizar las pantallas, cambiando el número de botones por pantalla, el tamaño de los mismos y la imagen mostrada por cada uno de ellos.

La plataforma de control de entorno se encuentra actualmente instalada en una sala de uso común de la sede en Santander de ASPACE Cantabria. A medio-largo plazo lo deseable sería instalar sistemas similares en los hogares y habitaciones de los usuarios para que éstos pudieran incorporarlos en su rutina habitual. En la práctica, el mayor obstáculo con el que se encuentran las familias es el alto coste de motorizar elementos como persianas, ventanas o puertas, aunque el hecho de que cada vez se encuentre en el mercado mayor variedad de motores accionados por infrarrojos es una buena señal del abaratamiento progresivo de este tipo de soluciones.

Agradecimientos

Los autores quieren a agradecer a los profesionales y usuarios de ASPACE Cantabria su colaboración en el diseño y validación del sistema de control. Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación proporcionada por la Obra Social de Caja Cantabria para el Proyecto IVANPACE.

Referencias

[1] Cans, C. (2000). "Surveillance of cerebral palsy in Europe: a collaboration of cerebral palsy surveys and registers." *Developmental Medicine and Child Neurology*, 42(12), 816-824

[2] Corralejo, R., Hornero Sánchez, R., González, Á., Martín González, L. (2012). "Improving the accessibility at home: implementation of a domotic application using a P300-based brain computer interface system." *Journal of Accessibility and Design for All*, 2, 1–14.

[3] Corralejo, R., Hornero, R., Álvarez, D. (2011). "A Domotic Control System Using Brain-Computer Interface (BCI). In *11th International Work-Conference on Artificial Neural Networks", IWANN 2011* (pp. 345–352). Torremolinos.

[4] Machado, M.-L., Guincestre, J.-Y., Aimé, M., Drouet, M.-H., Giry, C., LeDoze, F., Besnard, S. (2013). "Head Pilot: A new webcam-based Head Tracking System tested in permanently disabled patients". *IRBM*, 34(2), 124–130. doi:10.1016/j.irbm.2013.02.001

[5] Moghimi, S., Kushki, A., Marie Guerguerian, A., Chau, T. (2013). "A Review of EEG-Based Brain-Computer Interfaces as Access Pathways for Individuals with Severe Disabilities". *Assistive Technology*, 25(2), 99–110.

[6] Raya, R., Rocon, E., Gallego, J.A., Ceres, R., Pons, J.L. (2012) "A Robust Kalman Algorithm to Facilitate Human-Computer Interaction for People with Cerebral Palsy, Using a New Interface Based on Inertial Sensors". *Sensors. doi:10.3390/s120303049. 12. 3. 3049-3067.*

[7] Raya, R., Velasco, M.A., Rocon, E., Ceres, R. (2013) "Design of input/output mapping for a head mounted interface according to motor

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

signs caused by cerebral palsy". *Special Session: Human Computer Interfaces for People with Motor Disorders. AAATE 2013 Conference.*

[8] Ruiz, A., Arteaga, R., "Parálisis Cerebral y Síndromes Específicos e Individualidad en los Apoyos. Santander". *Universidad de Cantabria y otros.*

[9] Palomo, P., González, T., Rivas, R., Irazabal, I., Ruiz, A. (2009). "IRISCOM. Proyecto IRIS". In *IV Jornadas Iberoamericanas de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad.* Las tecnologías de apoyo en parálisis cerebral (pp. 87–91).

[10] Posada-Gomez, R., Rodriguez-Bernardo, C. (2012). "Development of a natural interaction interface for people with disabilities in a home automation control room". In *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Environments* (pp. 353–361).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ESTIMACIÓN DE PARAMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO

Elías Revestido Herrero
Univ. Cantabria. E.T.S. de Náutica, C/ Gamazo 1- 39004 Santander (Cantabria), revestidoe@unican.es

Francisco Javier Lastra Santos
Univ. Cantabria. E.T.S. de Náutica, C/ Gamazo 1- 39004 Santander (Cantabria), lastrafj@unican.es

Francisco J. Velasco González
Univ. Cantabria. E.T.S. de Náutica, C/ Gamazo 1- 39004 Santander (Cantabria), velascof@unican.es

José María Riola Rodríguez
Subdirección General de Tecnología e Innovación (SDG TECIN-DGAM), jriorod@fn.mde.es

Juan Jesús Díaz Hernández
Subdirección General de Tecnología e Innovación (SDG TECIN-DGAM), jjdiaz@ext.mde.es

Luis Manuel Vega Antolín
Univ. Cantabria. E.T.S. de Náutica, C/ Gamazo 1- 39004 Santander (Cantabria), vegalm@unican.es

Resumen *En base a un conjunto específico de ensayos, llevados a cabo en el canal de experiencias hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, se realiza una estimación de los parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático. Se ha realizado un modelización completa del comportamiento dinámico del vehículo teniendo en cuenta la dinámica del vehículo y sus actuadores mediante los datos obtenidos en el canal de experiencias hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR.*

Palabras Clave: Estimación de parámetros, modelo de maniobra, mínimos cuadrados.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de vehículos no tripulados, en el campo naval, es conocido ampliamente en el mundo científico. Sin embargo, es en el sector militar y de seguridad, los sectores que están tirando de esta tecnología con más fuerza en los últimos años. La formación de la flota constituye uno de los requisitos básicos para el diseño de una nueva generación de buques que se emplearán en varias misiones, como la limpieza de minas [12], guerra antisubmarina, perímetro de defensa, guerra de superficie, apoyo a las operaciones especiales fuerzas, etc.
La incorporación de vehículos no tripulados en Defensa, han contribuido al estado del arte de los sistemas no tripulados [13] para misiones peligrosas o de alto riesgo, tales como el seguimiento, la detección y neutralización de minas. Hoy en día, los AUV-UUVs son de suma importancia, tanto para aplicaciones y procedimientos para la exploración submarina en aplicaciones de defensa y civiles.

En construcción naval es muy importante la obtención de un modelo matemático de maniobra lo más exacto que sea posible. Así mismo, este requisito es también de vital importancia en aplicaciones de control de movimiento donde, ya que si el modelo matemático utilizado para el diseño de control no es exacto cuando se consideran las condiciones de funcionamiento del vehículo, o si existen perturbaciones externas, es difícil ajustar el controlador para un buen comportamiento del vehículo.
El objetivo de este trabajo es la obtención de un modelo matemático basado en las pruebas desarrolladas en las instalaciones del CEHIPAR.

2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL VEHÍCULO

La finalidad de este trabajo es la modelización del comportamiento dinámico de un vehículo subcuático. Para ello, se utiliza un vehículo comercial con forma de torpedo, propiedad de la Universidad de Cantabria (UC), para llevar a cabo ensayos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo CEHIPAR para determinar los parámetros del modelo matemático que describe el comportamiento dinámico. En esta sección se describen los elementos más importantes del hardware vehículo submarino, y las pruebas/ensayos que se han realizado. También se describen las pruebas de mar realizadas para verificar

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

las características dinámicas de comportamiento del vehículo.

2.1 VEHÍCULO SUBACUÁTICO NO TRIPULADO

El vehículo tiene forma de torpedo como se observa en la siguiente figura, siendo su eslora máxima de 1,65 m y su radio de 0,17 m. Su peso es de 35 kg y tiene una velocidad máxima de avance de 6 nudos. La forma de proa es una semiesfera y en popa tiene un cono con cuatro superficies planas de estabilización. Dispone de dos propulsores longitudinales cuyos ejes están separados del eje del cilindro 0.36 m. En la zona central dispone de un propulsor vertical y un orificio de compensación de presiones también vertical. El vehículo es autónomo y el sistema de generación de energía se basa en un juego de baterías tipo "Li-poly" (lithium polymer batteries) que le proporciona una autonomía aproximada de 1 hora para una velocidad de 3 nudos o de 2 horas a una velocidad de 2 nudos. El sistema de propulsión puede proporcionar una velocidad máxima de avance de 6 nudos y una velocidad máxima de marcha atrás de 3 nudos.

Figure 1 Vehículo subacuático no tripulado (C´Inspector, Kongsberg).

El vehículo cuenta con un propulsor vertical que le proporciona una velocidad máxima de 4,2 nudos. El casco está diseñado para permitir su operación hasta una profundidad máxima de 300 m, siendo la distancia máxima de operación de 1.000 m. En su parte frontal monta una cámara de vídeo y dos luces halógenas ajustables para reconocimiento o verificación en caso de que las condiciones de visibilidad marina así lo permitan. Además, el vehículo dispone de un sonar de navegación situado en la proa del vehículo y también de un sonar de barrido lateral.

A continuación se muestra un resumen de los parámetros que definen el movimiento del vehículo que se tratan de modelizar y los sensores que incorpora para su caracterización.

Tabla 1 Parámetros y sensores

Símbolo	Medida	Sensor
Ψ	Rumbo, guiñada	Acelerómetro
θ	Cabezada	Acelerómetro
Φ	Balance	Acelerómetro
z	Profundidad	Sensor de presión
N babor	RPM de la hélice de babor	Tacómetro
N estribor	RPM de la hélice de estribor	Tacómetro
Prop. Vert.	Propulsión vertical	Tacómetro
Pos. M	Posición de la masa	Potenciómetro

Además, el vehículo dispone de un sonar de barrido lateral, que se utiliza para llevar a cabo las funciones de inspección de los fondos marinos. La comunicación con el vehículo se realiza a través de un cable de fibra óptica que transporta los datos de manera bidireccional. De este modo, el operador puede controlar remotamente el vehículo a través de la "interfaz hombre-máquina" (HMI), ya sea mediante los comandos del teclado o utilizando una unidad de control de joystick. Para medir la posición del vehículo, se dispone de un sistema "Posicionamiento acústico de banda ancha" sistema (WAP) que incluye una antena GPS con tres hidrófonos, que se debe sumergir al menos un metro de profundidad.

2.2 PRUEBAS DE MAR

En la construcción de un vehículo marino, es habitual la realización de diferentes maniobras estándar o pruebas de mar [7]. Mediante ellas, además de evaluar su robustez, se pone de manifiesto las posibles limitaciones del sistema de control y el comportamiento del vehículo ante situaciones de emergencia.

Los datos obtenidos en las pruebas de mar también se pueden utilizar para la identificación de un modelo matemático de la dinámica del vehículo [2][10] [11]. Es por ello por lo que se ha desarrollado un software, que además de capturar datos de los distintos instrumentos del vehículo, pueda llevar a cabo la realización de maniobras estándar de forma automática actuando sobre la propulsión. En este caso particular se empleó el software libre Autohotkey [4], que permite la emulación de los datos que se introducen a través del teclado. De esta manera se pueden introducir comandos al propio software proporcionado por la empresa Kongsberg a través de otro software implementado con Autohotkey para actuar sobre la propulsión.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La finalidad principal de la aplicación implementada en Autohotkey en el soporte software, es la de actuar sobre la propulsión y capturar los datos de los instrumentos a bordo del vehículo. De esta manera, se podrá utilizar dicha aplicación en lazos de control para el control de los movimientos en fases posteriores. Además, la aplicación desarrollada en Autohotkey se puede integrar en otros entornos de programación como en el LabVIEW [3].

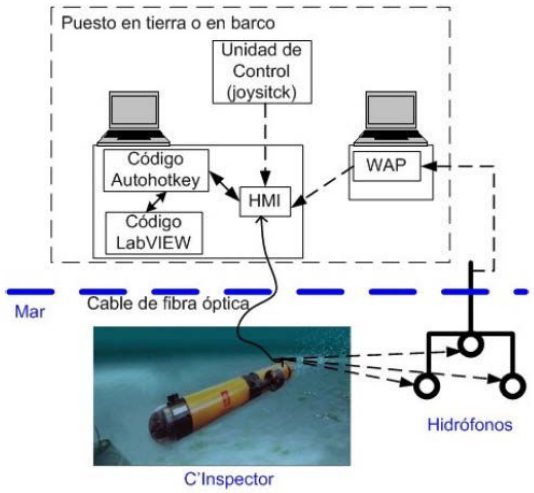


Figure 2 Integración del soporte software con el vehículo.

Las pruebas en el mar propuestas por la "International Towing Tank Conference" ITTC [1] que están resumidas en el artículo de López et al [9] incluyen, entre otros, la maniobra de curva de evolución, que se utiliza para calcular el radio de curvatura del vehículo y también para comprobar el comportamiento del sistema de propulsión en los cambios de rumbo. La figura 3 muestra las diferentes etapas de esta maniobra, que debido a su simplicidad, se puede hacer manualmente usando el control de la unidad de mando.

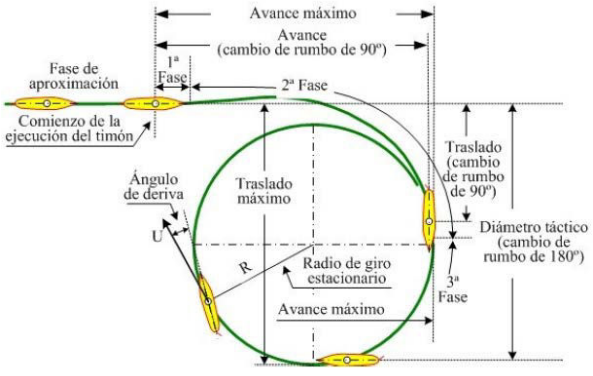


Figura 3 Curva de evolución.

Partiendo de lo expuesto y gracias a la herramienta desarrollada, se han obtenido valores como los que se muestran en la Figura 4.

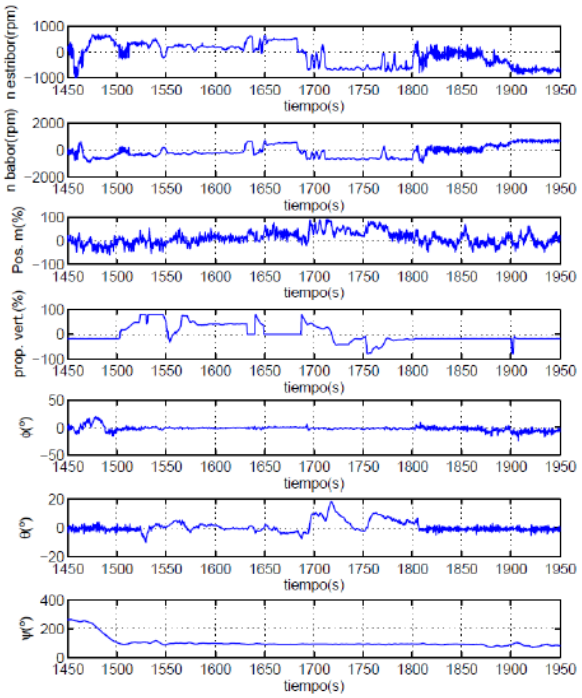


Figura 4 Datos adquiridos por el soporte de software para una maniobra de radio de giro en la Bahía de Santander.

2.3 MODELO MATEMÁTICO

Los vehículos submarinos se mueven en seis grados de libertad (GDL). Con el fin de describir el movimiento del vehículo, se necesitan tres coordenadas de traslación y otras tres para definir la orientación. Se utilizan dos sistemas de coordenadas para estudiar el movimiento de un vehículo: uno de ellos está fijado al vehículo y el otro se encuentra en Tierra (inercial) para describir su posición y orientación.

El modelo no lineal de maniobra 6 GDL se puede expresar de la siguiente forma [5][6]:

$$M\dot{\upsilon} + C(\upsilon)\upsilon + D(\upsilon)\upsilon + g(\eta) = \tau$$
$$y = \eta + w,\ \dot{\eta} = R(\eta)\upsilon, \qquad (1)$$

donde $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ es la posición y los ángulos de Euler, $\upsilon = [u, v, w, p, q, r]^T$ son las velocidades lineales y angulares, $\upsilon = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ son las fuerzas y momentos y w es el ruido en la medición. *M* es la masa adicional, $C(\upsilon)\upsilon$ son los términos de Coriolis, $g(\eta)$ es la matriz de restauración y $R(\eta)$ es la matriz de rotación.

Las fuerzas de amortiguación hidrodinámicas son una combinación de términos lineales y no lineales:

$$D(\upsilon)\upsilon = D_l\upsilon + D_{nl}(\upsilon)\upsilon \qquad (2)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En el presente trabajo, se ha utilizado como vehículo no tripulado uno comercial denominado (C'Inspector), en el que están montados tres motores: dos horizontales situados en el centro del vehículo para el movimiento de guiñada y una vertical para control de profundidad. El movimiento de cabeceo se logra con el desplazamiento de una más interna del vehículo. Por lo tanto, el empuje se puede expresar como:

$$T = \rho D_h^4 K_T(j_0) n \mid n \mid (1-t) \quad (3)$$

donde ρ es la densidad el agua (1000), D_h es el diámetro de la hélice, n son la revoluciones por segundo de la hélice, t es el factor de deducción de empuje (valores típicos: de 0.05 a 0.2) y K_T es el coeficiente adimensional [5]. Basándose en las ecuaciones de empuje (3) y el momento de guiñada, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \tau_{x,th} \\ \tau_{N,th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ d_p & -d_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_p \\ T_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde $\tau_{x,th}$ es la fuerza de avance, $\tau_{N,th}$ es el momento de yaw, d_p es la distancia del centro del vehículo a la hélice, T_p es el empuje de estribor y T_s el de babor. Además, si el ángulo de roll $\Phi \neq 0$, la siguiente ecuación se ha de tener en cuenta:

$$\tau_{M,th} = -\left(T_p - T_s\right) d_p \sin(\phi) \quad (5)$$

Las fuerzas generadas por los propulsores y el actuador de cabezada dan como resultado:

$\tau = [\tau_X, 0, \tau_Z, 0, \tau_M, \tau_N]^T$.

2.4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

En esta sección se resumen las pruebas que se realizaron en el CEHIPAR para la estimación de parámetros del modelo matemático definido anteriormente. La figura 5 ilustra el montaje del vehículo C'Inspector en las instalaciones del CEHIPAR. El conjunto de la Figura 5 tiene una mesa de medición, en el que se monta dos cilindros que sostienen el vehículo. Estos cilindros son comandados por los motores eléctricos. Los cilindros son del tipo de tornillo, para proporcionar una alta precisión en el movimiento. La mesa de medición se monta en un sistema que se mueve a lo largo del canal de experiencias CEHIPAR.

Antes de todos estos ensayos, es necesario determinar los momentos de inercia, el centro de gravedad y el centro de flotabilidad del vehículo. Los valores obtenidos se encuentran en la Tabla 2, que incluye los valores de peso con y sin el peso de la seguridad.

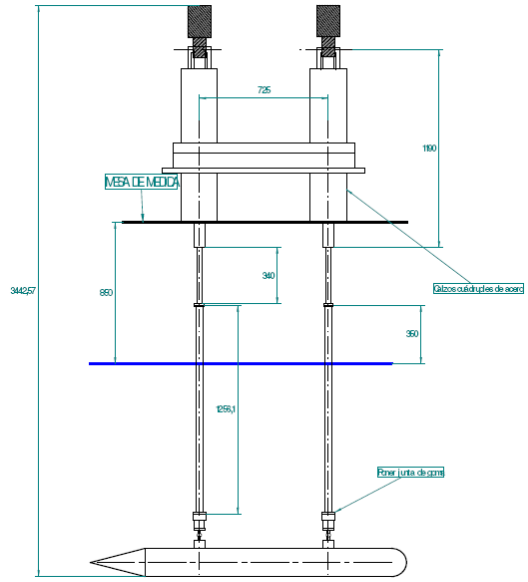


Figure 5 Esquema del montaje.

Table 1 Distribución de pesos

	Peso de Seguridad	
	con	sin
Peso (Kg)	33	34,34
xg (m)	0,184	0,167
zg (m)	-0,012	-0,012
Ixx (kg m2)	0,287	0,29
Iyy (kg m2)	7,105	6,945
Izz (kg m2)	7,233	7,073

Todos los parámetros que se han estimado, se refirieren a un sistema de coordenadas ortogonal a derechas con centro en el eje del cilindro a una distancia de 785 mm del extremo de proa del submarino (a la altura del cáncamo de sujeción situado entre el orificio del propulsor vertical y el orificio de compensación). El eje X se dirige hacia proa, el eje Y se dirige hacia babor y el eje Z se dirige hacia arriba. El sistema se indica en la Figura 6 dónde también se indican las direcciones positivas de los giros.

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- Remolcado a diferentes velocidades.
- Deriva estática.
- Cabezada estático (como el anterior pero con el vehículo gira 90°).
- Balance dinámico.
- Guiñada dinámico (como el anterior pero con el vehículo gira 90 °).
- Aceleración y el frenado.
- Arfada dinámica (como el anterior pero con el vehículo gira 90°).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

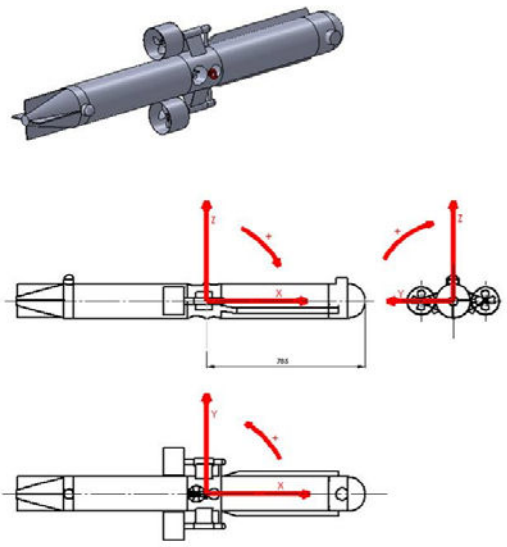


Figura 6 Sistemas de coordenadas.

Cada una de las pruebas se llevaron a cabo con dos o tres amplitudes, así como pruebas adicionales para caracterizar los propulsores. Las secciones siguientes muestran cada uno de los ensayos realizados para obtener el modelo matemático definido previamente. Los parámetros obtenidos en cada uno de los ensayos han sido estimados por mínimos cuadrados [8].

2.4.1 Resistencia y aceleración longitudinal

En este ensayo se arrastró el vehiculo C'Inspector en posición adrizada a velocidades que van entre 0.5 y 2.0 m/s. Estas velocidades se realizaron en una única carrera, donde se midió la masa adicional en las fases de aceleración y frenado
La ecuación en la fuerza X es:

$$X = X_0 + X_u u + X_{uu} u^2 + (-m + X_{\dot{u}})\dot{u} \quad (6)$$

Dónde X_0 es la resistencia a la velocidad nominal u_0 (1.5 m/s) y $u = U - U_0$ siendo U la velocidad real en cada instante.

2.4.2 Ensayo de autopropulsión y de giro con los propulsores

El ensayo de autopropulsión consistió en remolcar el modelo a la velocidad nominal mientras se variaban las revoluciones entre el 35% y el 60% de las revoluciones máximas. Si llamamos T al empuje efectivo (que incluye succión, estela rotativo-relativo, etc.), la fuerza total medida:

$$X = X_n n \quad (7)$$

Siendo n la diferencia entre las revoluciones reales n_r y las revoluciones nominales n_n (aquellas para las que la fuerza total es cero). Y el empuje efectivo T (en Newtons) se expresa como:

$$T = -X_0 + X_n n = -X_0 + X_n (n_r - n_n) \quad (8)$$

Dónde X_0 es la resistencia a la velocidad nominal calculada anteriormente.

2.4.3 Ensayo de maniobra con hélice vertical

Estos ensayos se realizaron llevando el torpedo a la velocidad nominal y con las revoluciones del punto de autopropulsión. A lo largo de la carrera se fueron variando las revoluciones del propulsor vertical entre -60% y +60% de las revoluciones máximas. Se ha ajustado un modelo de la forma:

$$X = X_{|\mu|}|\mu|, \; Z = Z_\mu \mu, \; M = M_\mu \mu \quad (9)$$

Dónde μ son las revoluciones del propulsor en % del máximo y con valor positivo cuando el empuje es hacia arriba. Se observa una clara asimetría en la fuerza X y el momento M entre la respuesta con el propulsor empujando hacia arriba o hacia abajo.

2.4.4 Ensayo de peso de trimado

Este ensayo se realizó con el vehículo parado desplazando el peso entre el 0 y el 100% del valor máximo.

2.4.5 Ensayos de pitch estático y pitch dinámico

El primero de ellos consistió en desplazar el vehículo a la velocidad nominal variando el ángulo de pitch (trimado). Esto introduce una velocidad vertical (en ejes del submarino) dada por:

$$w = U \sin\theta \quad (10)$$

Siendo U la velocidad nominal y θ el ángulo de cabezada.

Mientras que para el segundo el ensayo consistió en realizar una trayectoria sinusoidal en el plano vertical de forma que el eje longitudinal del submarino se mantenía tangente a la trayectoria en todo momento. De esta forma, en ejes del vehículo, solamente existe un movimiento de giro en cabezada. Como anteriormente, los ensayos se realizaron avanzando a la velocidad nominal y con un periodo de oscilación de 3 segundos. Las amplitudes de cabezada variaron

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

entre los 5º y los 10º. La fuerza vertical se ajusta al siguiente modelo lineal:

$$Z = Z_{\dot{q}}\dot{q} + (Z_q - mU)q \quad (11)$$

2.4.6 Ensayo de Arfada dinámico

El ensayo de Arfada dinámico consistió en hacer oscilar al vehículo en sentido vertical mientras se mantenía horizontal y avanzando a la velocidad nominal. Se eligió un periodo de oscilación de 3 segundos por considerarse una estimación razonable del tiempo de respuesta en maniobra. Las oscilaciones se efectuaron en una misma carrera con amplitudes que variaron desde los 0.05 a los 0.15 m. La fuerza vertical se aplica con un ajuste lineal del tipo:

$$Z = (-m + Z_{\dot{w}})\dot{w} + Z_w w \quad (12)$$

Siendo *m* es la masa del submarino y Z_w es la masa añadida.

2.4.7 Ensayos de guiñada estático y dinámico

Este ensayo consistió en desplazar el submarino a la velocidad nominal variando el ángulo de guiñada (deriva). Esto introduce una velocidad transversal (en ejes del submarino) dada por:

$$u = U \sin\psi \quad (13)$$

Siendo *U* la velocidad nominal y Ψ el ángulo de deriva. Los resultados para la fuerza transversal se obtienen con el mejor ajuste lineal que tiene la siguiente forma:

$$Y = Y_v v \quad (14)$$

El ensayo de guiñada dinámico consistió en hacer seguir al vehículo una trayectoria sinusoidal tal que su movimiento en ejes del vehículo consiste en una maniobra de guiñada oscilatoria pura avanzando a la velocidad nominal con los propulsores al régimen de autopropulsión. Se eligió el mismo periodo de oscilación descrito en el ensayo anterior, y las oscilaciones se efectuaron en una misma carrera con amplitudes que variaron desde los 5º a los 10º. La fuerza transversal se modeliza con un ajuste del tipo:

$$Y = Y_{\dot{r}}\dot{r} + (Y_r - mU)r + Y_{rrr}r^3 \quad (15)$$

2.4.8 Ensayo de transversal dinámico

Éste consistió en hacer oscilar el vehículo en sentido transversal mientras se mantiene avanzando a la velocidad nominal con los propulsores al régimen de autopropulsión. Se eligió el mismo periodo de oscilación que el ya indicado en el ensayo anterior por considerarse una estimación razonable del tiempo de respuesta en maniobra. Las oscilaciones se efectuaron en una misma carrera con amplitudes que variaron desde los 0.05 a los 0.15 m. La fuerza transversal adopta la siguiente forma:

$$Y = (-m + Y_{\dot{v}})\dot{v} + Y_v v \quad (16)$$

Siendo *m* es la masa del submarino y Y_v la masa añadida.

2.4.9 Ensayo de balance dinámico

Finalmente el último ensayo, correspondiente al de balance dinámico, consistió en hacer oscilar el vehículo alrededor del eje *X* mientras avanzaba a la velocidad nominal y con las revoluciones de autopropulsión. Se usó un periodo de 3 segundos y amplitudes de 10, 20 y 30º. Para el momento *K* alrededor del eje *X* se ha hecho un ajuste del tipo:

$$K = (-I_{xx} + K_{\dot{p}})\dot{p} + K_p p \quad (17)$$

Siendo I_{xx} la inercia respecto al eje longitudinal.

2.5 VALIDACION DEL MODELO

Como es habitual, en la aplicación de teoría de identificación de sistemas, para la validación del modelo obtenido, se han utilizado datos distintos a los empleados en la estimación. En este trabajo, por motivos económicos para no realizar un número elevado de ensayos, se han utilizado la mitad de los datos adquiridos en el Canal de Experiencias para la estimación y la otra mitad para la validación.

Existen distintas maneras de validar el modelo matemático [8], una de ellas consiste en comparar en una misma gráfica, las mediciones adquiridas con el modelo obtenido. De esta manera se comprueba si el ajuste del modelo a los datos es adecuado. En la figura 7 se observa que para el caso del ensayo de remolque el ajuste es bueno.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

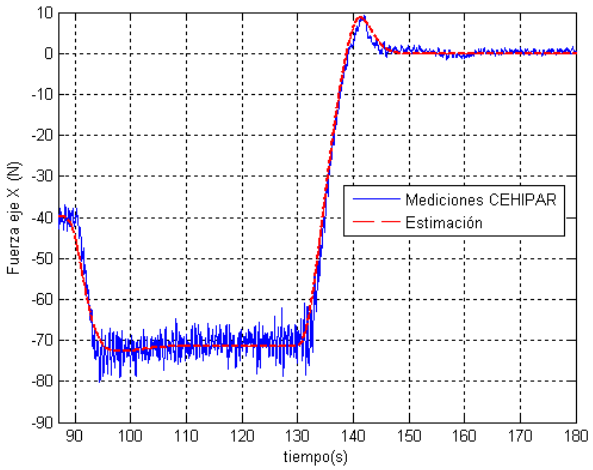


Figure 7 Validación del modelo para el ensayo de remolque.

Otra manera de validar el modelo es utilizando distintos tipos de métricas estadísticas. Una de estas métricas es el coeficiente de determinación $R^2(\%)$, que proporciona información de en qué medida, el modelo que se ha obtenido, es capaz de reproducir los datos medidos, y representa el porcentaje de variaciones de salida reproducidos por el modelo:

$$R^2(\%) = \frac{\sum(\hat{D} - \bar{D})^2}{\sum(\hat{D} - D)^2 + \sum(\hat{D} - \bar{D})^2} \quad (18)$$

Donde D y $\bar{D}$ representan los datos medidos y su media respectivamente, y $\hat{D}$ los datos generados por el modelo obtenido.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de validación, mediante el cálculo del coeficiente de determinación, para cada uno de los ensayos realizados. De esta manera se comprueba que el modelo obtenido es bueno, ya que para la mayoría de ensayos se obtienen un coeficiente $R^2(\%)$ cercano al 100%. Se ha de tener en cuenta que valor obtenido del coeficiente $R^2(\%)$ depende también de la relación señal/ruido de la medición correspondiente al ensayo en cuestión. Esto sucede, en el caso del ensayo del ensayo transversal dinámico dinámico en el que la relación señal/ruido es mayor y por lo tanto se obtiene un coeficiente $R^2(\%)$ menor.

Tabla 2 Resultados de cada uno de los coeficientes de determinación correspondientes a los 6GDL.

Ensayo	Fuerza	$R^2(\%)$
Resistencia y aceleración longitudinal	X (N)	69,23
Cabezada dinámico	Z (N)	47,93
Arfada dinámico	Z (N)	99,24
Guiñada dinámico	Y (N)	70,47
Transversal dinámico	Y (N)	96,86
	Momento	
Balance dinámico	K(Nm)	85,55

4 CONCLUSIONES

Este trabajo se ha realizado un estudio en términos de modelado de un vehículo subacuático no tripulado a través de un programa de ensayos apropiados en las instalaciones del CEHIPAR. Gracias a los datos adquiridos, ha sido posible estimar los coeficientes hidrodinámicos de un modelo no lineal de seis GDL de maniobra de un vehículo subacuático en forma de torpedo junto con los coeficientes de la propulsión que también se han estimado.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación en el que se ha abordado con ambición un área de interés creciente, lo que permite el análisis teórico en el campo de la simulación, proporcionando la posibilidad del diseño de controladores de movimiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO (DPI2011-27990) con fondos FEDER y por el Ministerio de Defensa Español, Programa COINCIDENTE (1003211003100).

Referencias

[1] 14th ITTC. (1975) Discussions and Recommendations for an ITTC 1975 Maneuvering Trial Code. 14th International Towing Tank conference, Ottawa, September 1975, p 348-365.

[2] Amerongen J. van.(1982) Adaptive steering of ships: A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping, Ph.D. dissertation. Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands. XII, 195.

[3] (2004). Learning with LabVIEW 7 Express. Pearson prentice hall.

[4] Chris Mallett.(2013). Autohotkey Documentation. Available from: http://ahkscript.org/docs/AutoHotkey.htm

[5] Fossen, T.I. (1994). Guidance and control of ocean vehicles. USA: Wiley, New York.

[6] Fossen, T. I. (2002). Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles. Marine Cybernetics AS, Trodheim, Norway.

[7] Lewis, V. (1998). Principles of Naval Arquitecture. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

[8] Ljung, L. (1999). System identification: Theory for the user (Second edition). Upper Saddle River, Prentice Hall Inc. New Jersey.

[9] López, E., Velasco, F., Moyano, E. and Rueda, T. (2004). Full Scale Manoeuvring Trials

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Simulation. Journal of Maritime Research, Vol. I. No. 3, pp. 37-50.

[10] Pérez, T., Mak, T., Amstrong, T., Ross, A., and Fossen, T. (2007). Validation of a 4 DOF manoeuvring model of a high-speed vehicle-passenger trimaran. 9th International Conference on Fast Sea Transportation FAST2007, Shanghai, China.

[11] Pérez, T. and Revestido, E. (2010). Structure selection in nonlinear ship manoeuvring models. 8th IFAC CAMS2010, Conference on Control Applications in Marine Systems. Warnemünde, Germany.

[12] Riola, J. y Díaz, J. (2009). Aplicación de los USV al rastreo de minas - Proyecto SIRAMICOR. 48º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima. Vigo, España.

[13] Riola, J. (2011). La política de I+D en Defensa: Metas y retos tecnológicos. En Las Tecnologías de Doble Uso: La Investigación y el Desarrollo al Servicio de la Sociedad Civil y Militar (pp. 13-22). Murcia, España: Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier.

[14] Velasco, F.J.; Revestido Herrero, E.; Lopez, L.; Moyano, E., Identification for a Heading Autopilot of an Autonomous In-Scale Fast Ferry, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.38, no.2, pp.263,274, April 2013, doi: 10.1109/JOE.2012.2227175.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Desarrollo de un sensor subacuático ultrasónico y RF para posicionamiento en tareas de manipulación robótica

Diego Centelles, Jorge Sales, Raúl Marín, Jose Vte. Martí, David Fornas and Pedro J. Sanz
Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores
Av. Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana (España)
Universitat Jaume I
{al132071, salesj, rmarin, vmarti, dfornas, sanzp}@uji.es

Resumen

En el contexto del proyecto nacional de manipulación autónoma submarina TRITON [1] (www.irs.uji.es/triton) se presenta el siguiente trabajo, el cual estudia métodos de localización de un brazo submarino con respecto a un panel de intervención, considerando que las condiciones de visibilidad del agua no permiten utilizar cámaras. Para ello, primeramente se diseña un sistema de balizas con radiofrecuencia y sónar, utilizando diferentes técnicas (RSSI, TDoA, *Range*), y experimentando en condiciones de laboratorio (cuba y piscina). Los resultados obtenidos demuestran que la técnica puede ser utilizada para aproximar el brazo manipulador al objeto donde se realizará la intervención (e.g. válvula), siendo posible una mayor resolución en trabajos futuros.

Palabras clave: Tiempo de llegada (ToA), Diferencia en Tiempo de Llegada (TDoA), Ultrasonidos, Radiofrecuencia (RF), posicionamiento.

1. Introducción

En escenarios acuáticos reales, especialmente en el fondo marino, la presencia de partículas en suspensión hace inviable en algunas ocasiones el uso de sensores ópticos y láser para la reconstrucción de las escenas y el guiado autónomo del brazo manipulador. Asimismo, existen situaciones en que, siendo la visibilidad perfecta, el guiado por visión no es posible debido al exceso de luz solar o incluso el tipo de texturas presentes en el fondo marino, situaciones que dificultan los algoritmos de cálculo del posicionamiento del objeto en la escena.

Como alternativa a la visión y el láser, el uso de sensores acústicos se está empezando a utilizar en este tipo de escenarios, siendo en su mayoría sonars especiales que proporcionan una imagen acústica, de baja resolución. Este tipo de sistemas presentan dos problemas fundamentales en el guiado de un brazo submarino. El primero, sus dimensiones, mayores que las de una cámara convencional, hacen de momento inviable su instalación en el antebrazo del manipulador. El segundo, el precio, alrededor de los 90.000 € en algunos casos, lo que dispara en demasía el valor del sistema real, no siendo fácil el disponer de un sistema de este tipo en un laboratorio de investigación. Versiones más sencillas de estos sónar son los multibeam (ver Fig. 1), que en lugar de una imagen acústica completa proporcionan unas 200 líneas aproximadamente de batimetría, pudiendo ser usados escaneando la escena con el vehículo con anterioridad a la manipulación, y realizando el agarre en bucle abierto. Aún así, siendo el precio aproximado del sonar multibeam de unos 20.000 €, sus dimensiones son todavía demasiado grandes para integrarlo en un brazo submarino eléctrico como el que disponemos en el laboratorio.

Figura 1: Sonar multibeam Tritech Gemini 720i (izqda.) Multibeam Echo Sounder Imagenex DT100 (dcha.)

Asimismo, existe una línea de investigación centrada en la transmisión de datos en el agua utilizando señales de radiofrecuencia [2]. Trabajos previos han demostrado que las señales de radio UHF son capaces de transmitirse en el agua hasta distancias de 25 m, utilizando las antenas necesarias. Por otro lado, estas frecuencias no se ven afectadas por la escasez de visibilidad, y se pueden adaptar, por medio de balizas de posicionamiento, para detectar la posición del brazo manipulador respecto a un objetivo en concreto. Además, el hardware necesario para el diseño de este sistema de realimentación por posicionamiento es barato, disponiendo de un prototipo preliminar usando la plataforma Arduino, y siendo necesario hacer algunas pruebas en el diseño de la antena, siguiendo los trabajos previos de la bibliografía.

Una de las aplicaciones de este sistema es la localización para manipulación en paneles de intervención submarinos como el utilizado en el proyecto

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

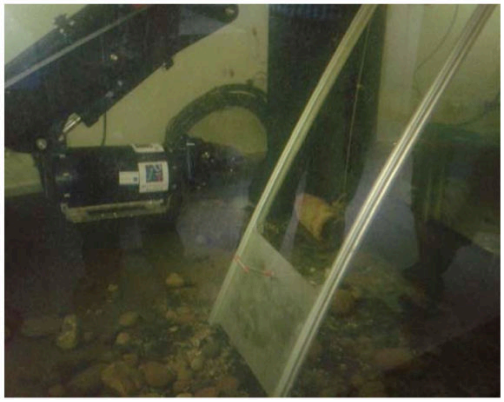


Figura 2: Escenario de trabajo: panel de intervención submarina donde se realizarán las manipulaciones autónomas, asociado al proyecto de I+D Nacional TRITON.

de I+D Nacional TRITON [1], proyecto que se encuentra en su tercer y último año de ejecución y al cual se está dedicando el grupo de investigación IRSLab de la UJI. Uno de los escenarios que propone TRITON como muestra de las capacidades desarrolladas es la intervención en un panel submarino (ver Fig. 2) en el contexto de los observatorios permanentes (apertura/cierre de válvulas, inserción/extracción de conectores).

2. Estado del arte / Trabajos relacionados

El medio acuático presenta enormes diferencias respecto de la atmósfera, donde habitualmente se desarrolla la actividad humana, especialmente en lo que respecta a la propagación de señales. Así, si bien las señales acústicas se propagan a mayores distancias, con mayor velocidad y menor atenuación, las electromagnéticas sufren efectos totalmente opuestos. Sin embargo, el rango de frecuencias típicas de las primeras las hace inapropiadas para su uso como soporte de comunicaciones de ancho de banda aceptable, lo cual ha estimulado el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas en medios acuáticos, tanto en el mar [3, 4] como en agua dulce [5] así como el desarrollo de elementos radiantes adaptados a estas circunstancias [6] que permitan incluso la transmisión de señales propias de las comunicaciones digitales [7, 8, 9, 10].

Los objetivos de este esfuerzo se dirigen tanto a la obtención de un soporte de comunicaciones [11, 2] como al desarrollo de los necesarios métodos de localización para los vehículos y dispositivos que deben desarrollar sus actividades en este medio, centrados estos últimos tanto en las señales acústicas [12, 13, 14] como radioeléctricas [15, 16].

Los métodos de localización se han clasificado en dos categorías principales: métricos y no métricos. Los métodos no métricos no realizan mediciones ni proporcionan posiciones exactas, sino estimadas o relativas a otros puntos conocidos, con lo cual no son de nuestro interés. Los métodos métricos más habituales son RSSI (Received Signal Strength Indicator), ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival). Mientras RSSI es complicado de implementar en medios acuáticos dada la escasa e irregular propagación de las ondas radioeléctricas, ToA resulta especialmente atractivo aplicado a las señales acústicas, dada su elevada propagación y baja velocidad. También TDoA puede resultar eficiente y preciso a distancias cortas aplicado a la combinación de señales acústicas y radioeléctricas.

En la actualidad, los métodos de localización subacuáticos pueden estar dedicados a la localización a cortas distancias o en escenarios oceánicos, destacando en estos últimos el proyecto Argo [17] –que emplea dispositivos que se comunican por medios acústicos bajo el agua para luego emplear tecnología radioeléctrica a través de satélite en la superficie– y el sistema Seaweb [18] de la marina estadounidense compuesto por una red híbrida acústica-radioeléctrica de vehículos autónomos, boyas, repetidores y embarcaciones capaces tanto de determinar su posición como de comunicarse entre sí y con el centro de mando en la costa.

En lo que a cortas distancias se refiere, [19] describe un método basado en RSSI para el cual se han llevado a cabo simulaciones que ponen de manifiesto su posible viabilidad. En general la presencia de estructuras cercanas como fondos marinos y, en nuestro caso en concreto, los elementos con los que se desea que interactúe el vehículo autónomo, introducen perturbaciones en la propagación que afectan a la precisión de este método. Por otro lado, en [20] y [21], se expone un sistema de exploración del fondo submarino formado con un conjunto de boyas móviles y robots autónomos que emplea un sistema acústico pasivo basado en filtros de partículas para la localización de los mismos. Las boyas obtienen su posición mediante GPS. Cada una de ellas emite una señal acústica propia con una signatura temporal que los vehículos autónomos detectan y procesan para determinar su propia localización.

3. Descripción del sistema propuesto

El objetivo es mejorar la manipulación autónoma submarina en condiciones de baja visibilidad im-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

plementando un sistema de guiado autónomo de un brazo manipulador subacuático, desarrollando para ello, un sistema de balizas de posicionamiento por UHF y/o sonido en un escenario en concreto, el cual consiste en la manipulación de unas válvulas situadas en un panel dentro del agua. A continuación se describe con detalle el sistema propuesto:

- **Cálculo de distancia desde el brazo al panel**: Desarrollo de un algoritmo que calcule la distancia entre una baliza acoplada en el brazo manipulador y otra situada en el panel de intervención. Cada baliza estaría contenida en un cilindro de PVC y consistiría en un transmisor/receptor de radiofrecuencia y/o un módulo transmisor/receptor de sonido. La baliza se instalaría en un punto conocido del panel de intervención submarino.
- **Cálculo de posición en un plano 2D del brazo respecto al panel**: Instalando una segunda baliza (del mismo tipo) en el panel y separando ambas a una distancia conocida, se puede triangular la posición del brazo manipulador (de la baliza acoplada al brazo) respecto a un objetivo en el panel en un plano 2D.
- **Intervención en el panel sin visibilidad**: Conociendo la profundidad del brazo por medio de los sensores de presión del vehículo que transporta el brazo y la dada por el sistema de balizas de radio y/o sonido, podría calcularse la posición 3D del brazo respecto al objetivo. Por lo tanto, en un entorno sin visibilidad podría utilizarse como error de entrada la posición del brazo calculada por este sistema para realizar una intervención sobre el objetivo. Para ello se usarían los algoritmos de control de movimiento del brazo desarrollados en el laboratorio IRS, e implementados a través de la plataforma ROS (Robotic Operating System [22]).

El problema principal reside en cómo calcular la distancia entre dos balizas de posicionamiento para, posteriormente, realizar una triangulación de la posición del brazo con respecto a la válvula.

Por un lado, se pretende saber si dado el RSSI de una señal de radio es posible calcular la distancia al origen con un error razonable dentro del agua. Para ello, sería necesario encontrar la relación existente entre la atenuación de la señal con la distancia en un escenario en concreto (donde el agua tiene unas propiedades concretas, etc).

Otro método se basa en el algoritmo TDoA, usando señales de radio y sonido, o en el tiempo que transcurre entre el envío de una señal acústica y la recepción de una respuesta, también acústica, es decir, mediante el algoritmo *Ping-Pong* o *Range*.

Además, también podría usarse un sistema híbrido, en el que se tuviesen en cuenta los datos recogidos por cada uno de los métodos descritos.

4. Experimentación previa en el agua

Se han construido dos balizas de radio y sónar usando el material disponible en el laboratorio con el objetivo de realizar unos experimentos en el agua para observar el comportamiento del RSSI, del TDoA y del tiempo de *Ping-Pong* o *Range* con la distancia.

4.1. Construcción de las balizas

El diseño hardware de cada baliza consta de: una Arduino Micro; un módulo de radio UHF BIM3B-868.30-64[1] [2] que opera en los 868.30 Mhz, con modulación FM, velocidad de transferencia de 64 kbps; un módem acústico subacuático *Micron Data Modem*[3], de Tritech; un adaptador de señales TTL-RS232 para la comunicación Arduino-módem, y una batería. La Arduino, el módulo UHF y el adaptador de voltajes están contenidos dentro de un cilindro de PVC, mientras que el módem, su batería y la antena de radio se conectan desde el exterior al interior del cilindro. La Fig. 3 muestra una visión interna de una baliza y la Fig. 4 dos balizas acopladas a dos barras de aluminio.

Los *Micron Data Modem* son capaces de transmitir cualquier trama de datos entre ellos, aunque no hay ningún tipo de control de errores, por lo que la información podría llegar corrupta al receptor. Además, poseen una interfaz de tres comandos de 4 bytes. El más importante de ellos es el *rng\n* (*Range*). Este comando, enviado a uno de los módems, hace que emita una señal de sonido y espere una respuesta de un segundo módem. Una vez recibida la respuesta, el módem realiza el cálculo de la distancia según el tiempo transcurrido desde el envío de la señal y transmite el resultado, en metros, por su puerto serie RS232. Esta forma de calcular la distancia recibe el nombre de *Range* o *Ping-Pong*. El problema está, tras realizar algunas pruebas, en que el cálculo de la distancia que realiza el firmware del módem puede tener

[1] Radiometrix Ltd. http://www.radiometrix.com.

[2] Datasheet: http://www.radiometrix.com/files/additional/bim3b.pdf

[3] Tritech Micron datasheet: http://www.tritech.co.uk/media/products/micron-data-modem.pdf

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 3: Componentes de una baliza. Toda la electrónica, salvo el módem, se encapsula dentro del cilindro de PVC.

un error de un metro de distancia, lo cual lo hace inviable para nuestro propósito. Para solventar este problema, se ha implementado un programa en Arduino que calcula manualmente el tiempo de *Ping-Pong*, es decir, que mide el tiempo que transcurre desde el envío de un mensaje acústico y la recepción de una respuesta, también acústica, de un segundo módem. Este programa utiliza la interfaz que ofrece el firmware del módem para poder enviar mensajes, por lo que no actúa ni tiene acceso sobre los componentes de bajo nivel del módem. Concretamente, la Arduino transmite tramas de 4 bytes a la interfaz RS232 del módem a 9600 baudios y éste se encarga de reenviar esa información por ultrasonidos. Cada uno de estos paquetes de 4 bytes constituye la señal acústica que se enviará junto con la señal de radio para que una baliza receptora calcule el TDoA.

Por otro lado, la Arduino envía los datos que constituirán el mensaje de radio al módulo UHF usando el protocolo serie a 19200 baudios. El tamaño de los datos transmitidos por mensaje de radio es de 17 bytes (sin contar los bits de control del propio protocolo serie). Entre estos 17 bytes se encuentra información para el control de errores mediante CRC16, un preámbulo y otros campos de datos. El módulo UHF se encarga de modular los valores lógicos de las señales recibidas del puerto serie de la Arduino, transmitiendo a una potencia máxima de 25 mW.

La antena de una baliza consta de un cable de una longitud aproximada de 1/4 de la longitud de onda. Como hemos dicho, la frecuencia de radio utilizada es de 868.30 Mhz. No obstante, en trabajos futuros se experimentará con los 433 Mhz y frecuencias situadas en las bandas VHF y HF.

4.2. Primeras pruebas y resultados

Utilizando las dos balizas construidas se ha recogido el TDoA y el tiempo de *Ping-Pong* o *Range* a diferentes distancias en dos escenarios subacuáticos de agua dulce distintos, tanto en la cuba de 2x2m disponible en el laboratorio, como en una piscina de 9x4m. La temperatura del agua en la cuba es de unos 21.5°C, mientras que en la piscina es de unos 30°C.

En todos los experimentos se ha obtenido un mínimo de 20 muestras por distancia para luego calcular la media y la desviación típica del muestreo en esa posición. Es necesario tener en cuenta que hay un tiempo, aproximadamente de 0.8 segundos, desde que se da la orden de envío de un mensaje acústico hasta que el módem transmite realmente el mensaje. Por lo tanto, el TDoA que se muestra en cada uno de los gráficos de este apartado no sólo incluye el tiempo de propagación de una onda sonora, sino también los tiempos de procesamiento de las señales realizados en la propia electrónica de la baliza. Algo parecido ocurre con el tiempo de *Ping-Pong*, donde también se incluyen los retardos ocasionados por la circuitería y el software.

4.2.1. Resultados RSSI y TDoA en cuba

En este escenario se ha realizado un muestreo del RSSI y del TDoA a distancias inferiores a 1 metro. La dificultad a la hora de situar las balizas a una posición deseada nos ha obligado primero a posicionar las balizas y luego medir la distancia entre una y otra a través de la pared de metacrilato de la cuba de agua (ver Fig. 4).

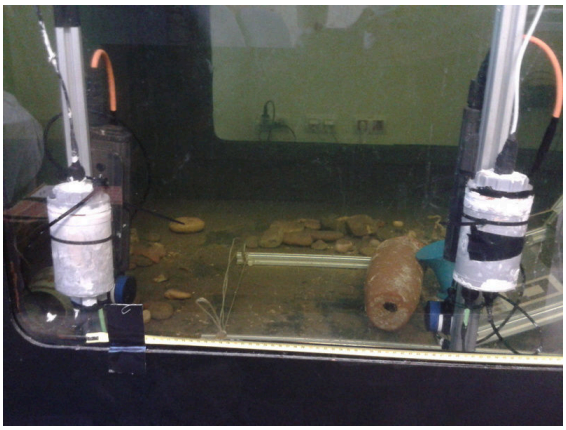


Figura 4: Dos Balizas acopladas en dos barras de aluminio y situadas a una distancia determinada entre ellas dentro de la cuba de agua.

En este primer experimento se ha realizado un muestreo aproximadamente a los 21, 26, 32, 44, 50, 60, 76 y 87 cm de distancia. Las figuras 5 y 6

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

muestran los resultados. La Fig. 5 muestra el RSSI de la señal de radio, mientras que en la Fig. 6 aparece el TDoA obtenido en cada posición.

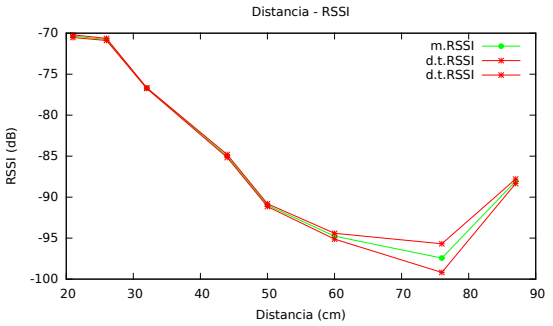


Figura 5: Distancia-RSSI en cuba. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición.

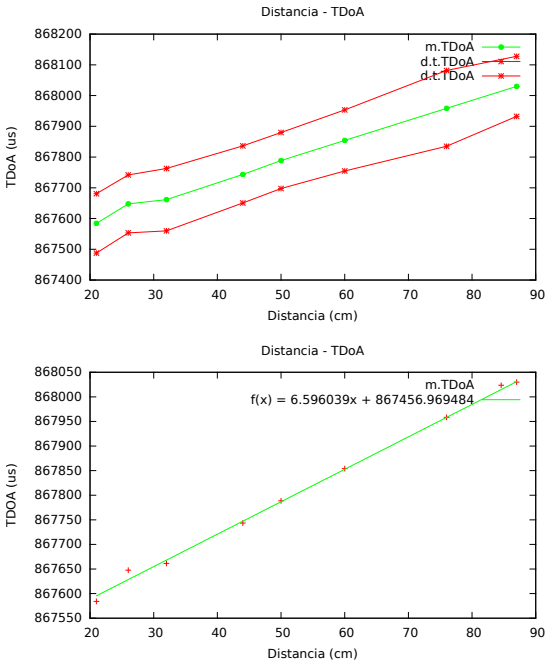


Figura 6: Arriba: Distancia-TDoA en cuba. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición. Abajo: Recta de regresión Distancia-TDoA en cuba. Los puntos rojos representan la media de las muestras en cada posición.

A diferencia de las muestras del RSSI que hubiésemos tenido en el aire, el RSSI obtenido en el agua muestra una relación mucho más estable (Fig. 5). Podemos observar cómo, en un entorno subacuático, la señal de radio se ve mucho menos afectada por las perturbaciones del entorno y, como cabía esperar, el RSSI disminuye con la distancia hasta los 76 cm. Sin embargo, en la posición de los 87 cm se observa una mejora de la señal recibida, lo cual podría estar relacionado con el hecho de que una de las balizas estuviese justo en la esquina de hierro de la cuba. Cabe tener en cuenta que las balizas se han situado lo más cerca posible a la pared de metacrilato de la cuba para poder medir de forma más precisa la distancia entre los módems acústicos y, como hemos dicho, el hecho de tomar mediciones cerca de paredes u otros objetos sólidos afecta al RSSI.

Respecto al TDoA (Fig. 6) hemos obtenido una relación claramente lineal (Fig. 6 abajo). Como podemos ver, existe una gran desviación típica debido a los cálculos y operaciones sobre los buffers que realiza el firmware de los módems, lo cual provoca pequeños pero variables retrasos en la transmisión o captación de los datos desde el momento en que se da la orden de envío.

4.2.2. Resultados Ping-Pong en cuba (Sólo sonido)

Al igual que con la prueba anterior, las balizas se han situado cerca de la pared de la cuba para realizar las mediciones con mayor precisión y sujetadas con unos gatos para evitar movimientos. La Fig. 7 muestra los resultados obtenidos aproximadamente en las posiciones de los 11, 22, 33, 47, 57, 70 y 80 cm. Como podemos observar en la Fig. 7, se trata de una relación directamente proporcional y, como cabía esperar, lineal (Fig. 7 abajo). Sin embargo existe una desviación típica bastante mayor (unas catorce veces mayor) a la obtenida en la prueba anterior. Esto se debe a que en este algoritmo existe una dependencia aún mayor con los módems acústicos, ya que se envían y reciben datos dos veces, lo que provoca que se agudicen los efectos ocasionados por las operaciones internas del firmware que habíamos comentado analizando los resultados en 4.2.1.

4.2.3. Resultados RSSI y TDoA en piscina

Para aumentar la distancia en las mediciones hemos repetido las pruebas en una piscina 9x4m. Para llevarlo a cabo se han construido unas boyas usando corcho y palos de aluminio (Fig. 8). De esta manera hemos conseguido separar las balizas un poco de la pared de la piscina para tomar las medidas y así reducir los efectos por los rebotes.

Otra de las diferencias de este escenario con el anterior ha sido las propiedades del agua. A diferencia del agua de la cuba, donde estaba clara y limpia, el agua contenida en la piscina contenía suciedad y partículas que impedían la visión. Con las antenas que hemos utilizado hemos podido llegar hasta los 4 metros de distancia, aunque

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

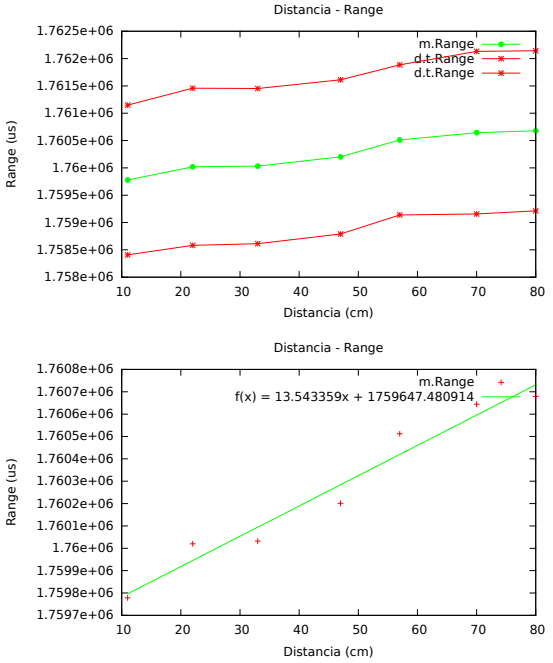


Figura 7: Arriba: Distancia-Range en cuba. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición. Abajo: Recta de regresión Distancia-Range en cuba. Los puntos rojos representan la media de las muestras en cada posición.

Figura 8: Una boya construida para poder realizar las pruebas en la piscina. La baliza está acoplada en la parte inferior.

con una caída de la señal de radio de -105.68 dB. Las Figs. 9 y 10 muestran los resultados obtenidos aproximadamente en las distancias 100, 200, 300 y 400 cm.

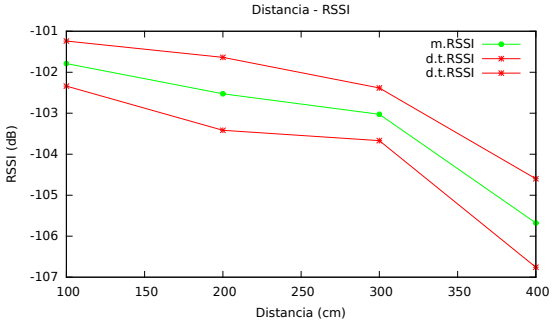


Figura 9: Distancia-RSSI en piscina. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición.

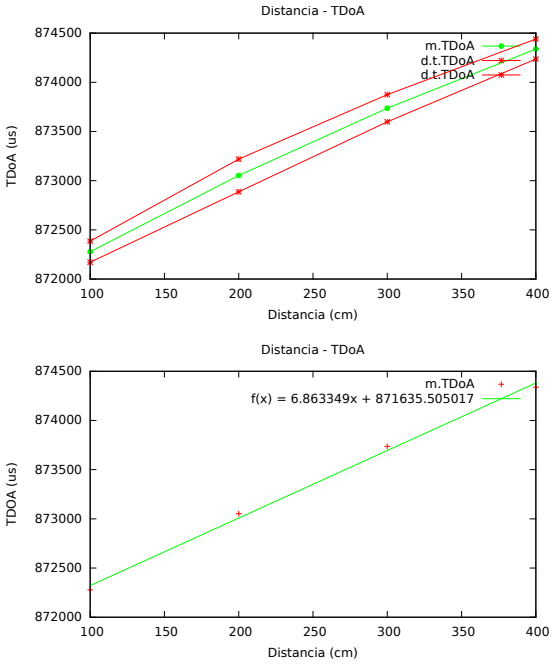


Figura 10: Arriba: Distancia-TDoA en piscina. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición. Abajo: Recta de regresión Distancia-TDoA en piscina. Los puntos rojos representan la media de las muestras en cada posición.

La Fig. 9 muestra el RSSI obtenido. Como podemos ver, existe una ligera desviación típica ocasionada por los movimientos sutiles de la boya flotando en el agua. Si comparamos el RSSI obtenido a menos de 1 metro (Fig. 5), con el obtenido en la piscina (Fig. 9), podemos observar cómo decrece más rápidamente antes de llegar al metro de distancia y luego lo hace de forma más moderada como si se siguiera una relación logarítmica, lo cual concuerda con el hecho de que el RSSI en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

la recepción sea inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Respecto al TDoA (Fig. 10) los resultados no son muy diferentes a los obtenidos en las pruebas en la cuba del laboratorio. Sin embargo, en sentido estricto, la recta de regresión de los resultados obtenidos en la piscina difiere un poco de la obtenida en la cuba, puesto que tanto la pendiente como la ordenada al origen son algo más altas. Esto podría ser debido a las características propias del entorno, como las propiedades del agua, las partículas en suspensión y otros cuerpos de alrededor.

4.2.4. Resultados *Ping-Pong* en piscina (Sólo sonido)

Al igual que en la cuba, se han realizado unas pruebas usando al algoritmo Range, pero esta vez realizando un muestreo cada 100 cm hasta los 9 metros. La Fig. 11 muestra los resultados del experimento. Como podemos ver, el resultado ha sido prácticamente idéntico a los obtenidos en la cuba. Por lo tanto, podríamos decir que las propiedades del entorno no han afectado de forma notable al algoritmo puramente acústico. Sin embargo, esta vez la realización de estas pruebas se ha realizado en un agua clara, muy similar a la contenida en la cuba.

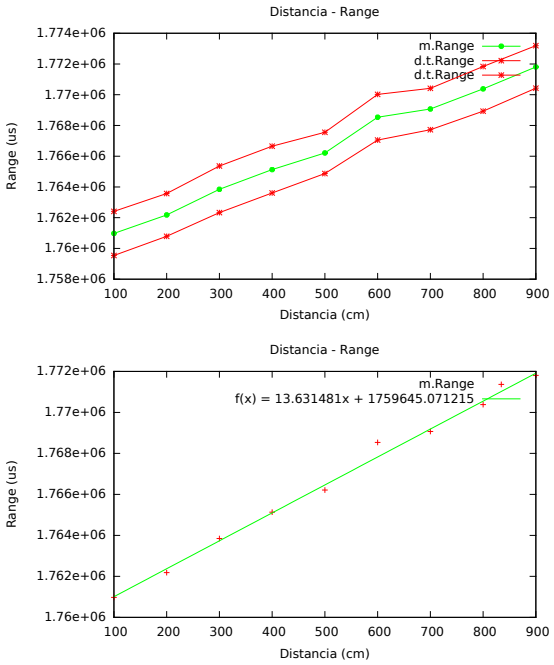


Figura 11: Arriba: Distancia-Range en piscina. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición. Abajo: Recta de regresión Distancia-Range en piscina. Los puntos rojos representan la media de las muestras en cada posición.

4.3. Conclusiones de los resultados previos

Si comparamos los resultados obtenidos con el algoritmo puramente acústico (*Range*) y los obtenidos con el algoritmo TDoA, podemos concluir que el segundo es aproximadamente dos veces más rápido que el primero, es decir, para obtener una muestra del tiempo de Ping-Pong es necesario dos veces el tiempo que necesitamos para obtener una muestra de TDoA. La desviación típica del TDoA es, como dijimos en el apartado 4.2.2, unas 14 veces más baja que la de *Range*, lo qual hace que el TDoA sea más exacto. Además, las aproximaciones de las rectas Distancia-Tiempo tienen un error muy inferior en el caso del TDoA.

Por otro lado, la ventaja de la técnica púramente acústica (Los *Ping-Pong* o *Range*) es que con ella podríamos obtener distancias de hasta 1 km de distancia bajo el agua. No obstante, tal cualidad no nos sirve si nuestro objetivo es la manipulación submarina de objetos en un rango de escasos metros.

Respecto al RSSI de la señal de radio, hemos comprobado que depende demasiado del escenario subacuático, no sólo de las propiedades del agua, sino también de los posibles objetos que puedan haber en la escena de intervención. Por este motivo no creemos que el RSSI, por sí solo, pueda usarse para calcular una distancia con el error que necesitamos.

Para cumplir nuestro objetivo necesitamos una técnica lo más rápida y exacta posible, con un error máximo de pocos centímetros, que nos permita coger un objeto cualquiera de forma precisa. Por lo tanto, hemos considerado conveniente realizar un prototipo del sistema propuesto que use esta técnica para obtener la distancia a cada baliza. Sin embargo, tomando una muestra cualquiera de TDoA seguimos teniendo un error de unos 20 cm, el cual sigue siendo demasiado grande. Por lo tanto, utilizando las balizas construidas en este estudio no es posible construir un sistema de posicionamiento que nos sirva para la manipulación, pero sí para realizar un primer acercamiento al blanco. No obstante, hemos comprobado que tomando una media de varias muestras en una misma posición podemos reducir el error.

Por otro lado, hemos comprobado que la relación entre el TDoA y la distancia depende de las propiedades del escenario. Por lo tanto, sería necesario realizar una calibración del sistema en un entorno subacúatico muy similar a donde se encuentra el panel antes de realizar una intervención.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5. Prototipo del sistema propuesto

Se ha realizado un prototipo del sistema de posicionamiento propuesto (sección 3) usando las balizas construidas en la experimentación previa en el agua (sección 4). Se han situado dos balizas en el panel de intervención de manera que los módems acústicos se encontrasen a una distancia conocida del objetivo, en este caso, una válvula situada en el centro. Situando una tercera baliza (del mismo tipo) en el brazo manipulador ha sido posible realizar una triangulación en un plano 2D para obtener la posición del brazo respecto a la válvula (Fig. 12). Las distancias calculadas deberían ser similares a las distancias que existen entre el módem acoplado en el brazo y los situados en el panel, es decir, no importa demasiado dónde posicionar los cilindros de PVC, pero sí dónde están los módems y conocer su posición en el brazo y en el panel.

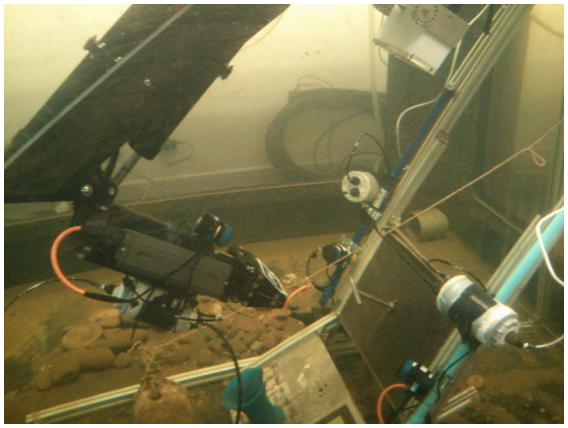


Figura 12: Prototipo del sistema de posicionamiento propuesto (Apartado 3).

5.1. Calibración del sistema

En primer lugar, ha sido necesario realizar una calibración exhaustiva del sistema de posicionamiento calculando la recta TDoA-Distancia. Para ello se ha realizado un muestreo del TDoA entre dos balizas en 18 distancias diferentes (ver Fig. 13). La Fig. 14 muestra la recta de regresión Distancia-TDoA resultado del muestreo y su inversa, es decir, la recta que usaremos para obtener la distancia dado el TDoA.

Como se puede observar en la Fig. 14 (abajo), la pendiente de la recta, 0.1423 cm/μs, es muy similar a la velocidad del sonido en agua dulce (0.1435 cm/μs).

5.2. Pruebas y resultados experimentales

Hemos realizado una comparativa entre las distancias experimentales del brazo a cada baliza y las

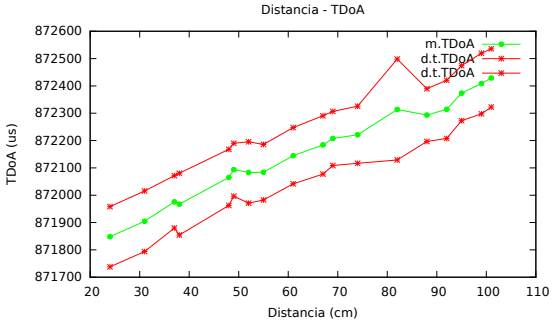


Figura 13: Distancia-TDoA en cuba. Las líneas rojas representan la desviación típica, mientras que la verde es la media de las muestras en cada posición.

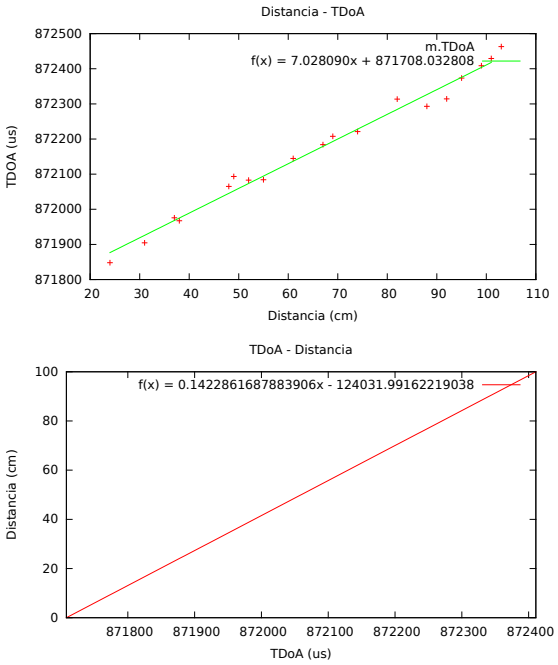


Figura 14: Arriba: Recta de regresión Distancia-TDoA en piscina. Los puntos rojos representan la media de las muestras en cada posición. Abajo: Recta TDoA-Distancia. Es la inversa de la anterior. Se usa para obtener la distancia dado el TDoA.

reales, en 13 posiciones diferentes del brazo (ver Fig. 15).

Como podemos ver, existen posiciones en que la distancia experimental difiere enormemente de la real debido a que la totalidad de las muestras de TDoA en esas posiciones han sido extremadamente altas. Las causas podrían ser varias:

- El mensaje acústico se pierde siempre a causa de un obstáculo, que podría ser el propio brazo, y en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

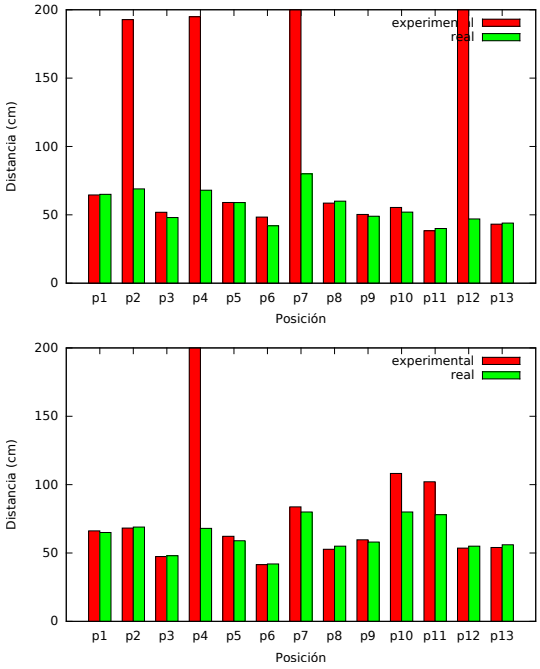


Figura 15: Arriba: Distancias experimentales y reales entre el módem en el brazo y la baliza a la izquierda del panel. Abajo: Distancias experimentales y reales entre el módem en el brazo y la baliza a la drecha del panel.

su lugar se recibe un rebote del mismo.

- Cuando la potencia de la señal de radio recibida es muy baja aparecen interferencias por modulaciones erróneas que producen datos falsos o con errores en el buffer de entrada de la Arduino. Puesto que el control de errores y el descarte de datos sin preámbulo se realiza a través del programa cargado en la Arduino, el tiempo utilizado en estas tareas también influye a la hora de comprobar si se ha recibido un mensaje de radio o no.

- Otras causas no consideradas.

En la Fig. 16 se muestra una comparativa entre las posiciones obtenidas de forma experimental (para aquellos casos en los que se ha encontrado una solución por triangularización) y las reales (obtenidas a partir de medición directa). La distancia media entre la localización real y la experimental es de 3.1 cm.

6. Conclusiones

Podemos concluir que los sistemas combinados de radiofrecuencia y sónar son una alternativa para el diseño de sistemas de manipulación autónoma submarina en condiciones de baja visibilidad, y en especial, en escenarios donde el vehículo sub-

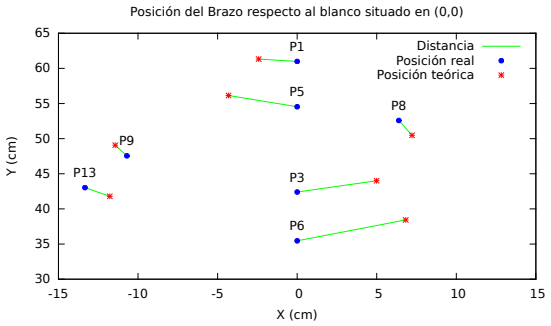


Figura 16: Comparación entre las posiciones reales del brazo en un plano 2D y las experimentales.

marino está en posición *docking* con respecto a un panel de intervención. El sistema diseñado ha demostrado localizar el brazo con respecto al panel con una resolución entre 1 y 10 cm. Trabajos futuros se centrarán en la mejora de la sincronización de la señal sónar submarina, con el objetivo de medir mejor el tiempo de vuelo de la misma con respecto a la señal de radio frecuencia.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, código de proyecto DPI2011-27977-C03 (proyecto TRITON), por la Universitat Jaume I y Fundación Caixa Castelló-Bancaixa, proyecto PI·1B2011-17, y por una beca-colaboración en el Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores de la Universitat Jaume I.

Referencias

[1] TRITON, "Multisensory Based Underwater Intervention through Cooperative Marine Robots," http://www.irs.uji.es/triton/.

[2] H. Zhang and F. Meng, "Exploiting the skin effect using radio frequency communication in underwater communication," in *Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE), 2012 International Conference on*, Aug 2012, pp. 1150–1153.

[3] M. Siegel and R. W. P. King, "Electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 4, pp. 507–513, Jul 1973.

[4] A. Shaw, A. Al-Shammaá, S. Wylie, and D. Toal, "Experimental investigations of electromagnetic wave propagation in seawater," in *Microwave Conference, 2006. 36th European*, Sept 2006, pp. 572–575.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[5] L. Shen, R. King, and R. Sorbello, "Measured field of a directional antenna submerged in a lake," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 6, pp. 891–894, Nov 1976.

[6] C. Conessa and A. Joisel, "Active wideband antenna for underwater tomography (1 ghz)," *Electronics Letters*, vol. 45, no. 4, pp. 193–194, February 2009.

[7] H. Guarnizo Mendez, C. Gac, F. Le Pennec, and C. Person, "High performance underwater uhf radio antenna development," in *OCEANS, 2011 IEEE - Spain*, June 2011, pp. 1–5.

[8] H. Guarnizo Mendez, F. Le Pennec, C. Gac, and C. Person, "Deep underwater compatible wi-fi antenna development," in *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2011 14th International Symposium on*, Oct 2011, pp. 1–5.

[9] Z. Hao, G. Dawei, Z. Guoping, and T. Gulliver, "The impact of antenna design and frequency on underwater wireless communications," in *Communications, Computers and Signal Processing (PacRim), 2011 IEEE Pacific Rim Conference on*, Aug 2011, pp. 868–872.

[10] B. Gulbahar and O. Akan, "A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 9, pp. 3326–3334, September 2012.

[11] A. A. Abdou, A. Shaw, A. Mason, A. Al-Shammaá, S. Wylie, and J. Cullen, "Wireless sensor network for underwater communication," in *Wireless Sensor Systems (WSS 2012), IET Conference on*, June 2012, pp. 1–6.

[12] M. Erol-Kantarci, S. Oktug, L. Vieira, and M. Gerla, "Performance evaluation of distributed localization techniques for mobile underwater acoustic sensor networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 9, no. 1, pp. 61–72, Jan. 2011. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.05.002

[13] M. Erol-Kantarci, H. Mouftah, and S. Oktug, "A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 13, no. 3, pp. 487–502, Third 2011.

[14] G. Han, J. Jiang, L. Shu, Y. Xu, and F. Wang, "Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey," *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 2026–2061, 2012. [Online]. Available: http://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/2026

[15] V. Chandrasekhar, W. K. Seah, Y. S. Choo, and H. V. Ee, "Localization in underwater sensor networks: Survey and challenges," in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, ser. WUWNet '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 33–40. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161047

[16] M. Hosseini, A. Samad, and S. A. Razak, "Underwater wireless sensor network localization," in *Proceedings of the 5th postgraduate annual research seminar (PARS'09)*, Johor, Malaysia, 2009.

[17] W. J. Gould and J. Turton, "Argo –sounding the oceans," *Weather*, vol. 61, no. 1, pp. 17–21, 2006. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1256/wea.56.05

[18] J. A. Rice, "Us navy seaweb development," in *Proceedings of the Second Workshop on Underwater Networks*, ser. WuWNet '07. New York, NY, USA: ACM, 2007, pp. 3–4. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/1287812.1287814

[19] D. Park, J. Kim, and W.-K. Chung, "Simulated 3d underwater localization based on rf sensor model using ekf," in *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2011 8th International Conference on*, Nov 2011, pp. 832–833.

[20] S. Wang, L. Chen, H. Hu, Z. Xue, and W. Pan, "Underwater localization and environment mapping using wireless robots," *Wireless Personal Communications*, vol. 70, no. 3, pp. 1147–1170, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/s11277-013-1106-z

[21] T. Ojha and S. Misra, "Mobil: A 3-dimensional localization scheme for mobile underwater sensor networks," in *Communications (NCC), 2013 National Conference on*, Feb 2013, pp. 1–5.

[22] M. Quigley, K. Conley, B. P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SLAM VISUAL HÍBRIDO TOPOLÓGICO-MÉTRICO MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL

L. Fernández, L. Payá, A. Gil, A. Peidró, O. Reinoso
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Miguel Hernández. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche (Alicante), Spain
l.fernandez@umh.es, lpaya@umh.es

Resumen

En este trabajo se propone un método basado en la apariencia global de escenas para detectar cierres de ciclo en un proceso de SLAM visual (Simultaneous Localization and Mapping). Para resolver este problema, hacemos uso de imágenes omnidireccionales capturadas por un robot en un entorno interior y de su odometría interna. Para describir las escenas hacemos uso de métodos basados en la apariencia global. Durante el proceso de SLAM, se construyen dos mapas del entorno, uno métrico y otro topológico, con relaciones entre ellos. Estas relaciones son actualizadas en cada iteración de nuestro algoritmo. El mapa topológico es un grafo construido a partir de la información de apariencia de las escenas. Se añade un nuevo nodo cuando la nueva información visual es suficientemente distinta de la información previa. Al mismo tiempo, comprobamos un posible cierre de ciclo topológico con los nodos previos. Por otro lado, estimamos la posición métrica de la nueva pose usando un enfoque Monte-Carlo con el objetivo de construir un mapa métrico. Los resultados experimentales demuestran la validez del método.

Palabras clave: Descriptor de apariencia visual global, visión omnidireccional, SLAM, Mapa híbrido topológico-métrico, detección de cierre de ciclo.

1. INTRODUCCIÓN

La creación de mapas y localización de forma simultánea (SLAM) ha recibido gran atención en los últimos años, y constituye un paso fundamental para el diseño de robots móviles autónomos. Las técnicas de SLAM consideran la situación en la que un vehículo autónomo construye un mapa de un entorno desconocido a la vez que utiliza este mapa para estimar su posición. Podemos afrontar el problema de SLAM desde tres enfoques distintos: SLAM topológico, que representa la posición del robot mediante una lista de estados, de modo que el mapa está compuesto por una lista de localizaciones y relaciones de conectividad espacial entre ellas [7]; SLAM métrico, que incluye en el mapa un conjunto de poses del robot junto con relaciones métricas entre ellas, de modo que la posición del robot en el mapa puede ser estimada con precisión geométrica [5]; y SLAM híbrido topológico/métrico, que combina la eficiencia computacional de los mapas topológicos con la precisión y nivel de detalle de los métricos [14].

Actualmente, es habitual que las técnicas de SLAM hagan uso de visión por computador para construir el mapa y estimar la posición del robot. Estos problemas pueden afrontarse desde dos puntos de vista. En primer lugar, los métodos basados en la extracción de características consisten en extraer, describir y seguir a lo largo de un conjunto de escenas ciertos puntos o regiones de interés (como SIFT o SURF) [15]. En segundo lugar, los métodos basados en la apariencia tratan de crear una base de datos que contiene un único descriptor de apariencia global por escena (usando, por ejemplo, análisis de Fourier, de componentes principales, etc.) [10, 2].

En este trabajo presentamos un marco unificado para llevar a cabo SLAM híbrido métrico-topológico, afrontando el problema de SLAM como un problema de estimación discreta (SLAM topológico) y un problema continuo (SLAM métrico).

Para que el proceso de SLAM sea capaz de construir un mapa correcto del entorno, es fundamental implementar un algoritmo de detección de cierre de ciclos. Es necesario que el robot sea capaz de decidir si la actual posición ha sido previamente visitada. Para resolver este problema de forma eficiente, resulta fundamental una elección adecuada del método para describir las escenas y una optimización del problema de asociación de datos [6, 17]. La representación de las escenas es uno de los puntos cruciales. En este trabajo hacemos uso de un descriptor de apariencia global para describir las escenas capturadas por el robot en cada iteración. Además, llevamos a cabo el proceso de cierre de ciclo cuando la apariencia de la escena actual es suficientemente similar a un escena previamente capturada.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 introduce el método utilizado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

para construir el grafo topológico. A continuación, en la sección 3 se describe el algoritmo implementado para construir el mapa híbrido. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la sección 4. Finalmente, el apartado 5 muestra las conclusiones del trabajo y las líneas de investigación futuras.

2. CONSTRUCCIÓN DE UN MAPA TOPOLÓGICO TIPO GRAFO

2.1. DESCRIPTOR DE APARIENCIA GLOBAL

Para crear el mapa topológico haremos uso de la apariencia global de las escenas omnidireccionales. De este modo, es necesario construir un descriptor por escena que represente la información contenida en la misma en su conjunto. Este descriptor debería retener tanta información como sea posible con un tamaño relativamente bajo, el coste computacional necesario para su cálculo debería ser razonable y por último, debería ser robusto ante cambios en las condiciones de iluminación del entorno. Por estos motivos, haremos uso de dos descriptores que han demostrado capacidad para describir correctamente las escenas y compararemos su desempeño. Estos descriptores son la Firma de Fourier [8, 9] y el Histograma de Orientación del Gradiente (HOG) [1, 3].

2.2. SLAM TOPOLÓGICO

El enfoque híbrido que proponemos para la creación del mapa consiste, en primer lugar, en describir el entorno de manera topológica, haciendo uso de un grafo. Cada nodo representa un área del entorno y contiene una o varias imágenes que poseen una apariencia visual similar. Por su parte, los enlaces indican las relaciones de conectividad espacial entre nodos [11]. Para calcular la imagen más representativa de cada nodo, calculamos la similitud entre cada par de imágenes del nodo, $S(i,j)$ mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$S(i,j) = \frac{1}{D(i,j)}$$
$$D(i,j) = \sqrt{\sum_m \sum_n (FS_i(m,n) - FS_j(m,n))^2} \quad (1)$$

Donde FS_i es el descriptor de la imagen panorámica I_i y m y n son el número de componentes que tiene el descriptor en filas y columnas respectivamente. De este modo, cuando más cercanas (similares) son las imágenes, menor es la distancia D y mayor es la similitud S. Una vez que se ha calculado la similitud entre cada par de imágenes, se calcula la imagen representativa mediante las siguientes expresiones:

$$R = arg\,\max_{i \in P}(\min_{j \in P, i \neq j}(S(i,j)))$$
$$N_R = \max_{i \in P}(\min_{j \in P, i \neq j}(S(i,j))) \quad (2)$$

Donde P representa el conjunto de nodos del grafo. R es la imagen que mejor representa la información contenida en el nodo y N_R es su factor de similitud mínimo.

Cada vez que el robot captura una nueva imagen I, comprueba si esta imagen es parte de la región definida por el nodo actual, usando para ello la imagen representativa de dicho nodo R. Si la similitud S está por encima de cierto umbral (Th), se añade la imagen al nodo actual. Sin embargo, si la similitud no supera el umbral, se compara con las imágenes representativas de los nodos vecinos al actual, y se selecciona el nodo con la mayor similitud (cierre de ciclo). Para ello, se hace uso de un nuevo umbral (Th_{nei}) menor que el anterior, para dar prioridad a los nodos vecinos. En el caso en que la similitud no exceda este umbral vecino, la imagen se compara con las representativas del resto de nodos, y si supera el umbral mínimo (Th) se añade al nodo correspondiente (cierre de ciclo). Finalmente, en caso de que no se encuentre ninguna correspondencia, se añade un nodo nuevo al grafo y, consecuentemente, se añade un enlace entre el nuevo nodo y el anterior. Por otro lado, cada vez que añadimos una imagen a un nodo existente, si $Th \leq S(i,j) \leq N_R$, se recalcula la imagen representativa de dicho nodo. Estos umbrales han sido ajustados de forma empírica según el tipo de entorno en que navega el robot.

3. SLAM MÉTRICO

Desde el punto de vista métrico, el algoritmo propuesto estima la posición y orientación del robot respecto a un sistema de referencia con precisión geométrica. La propuesta que presentamos consiste en un SLAM visual basado en un trabajo previo [16], en el que desarrollamos una odometría visual para estimar la trayectoria seguida por un robot haciendo uso únicamente de la información suministrada por una cámara. En el presente trabajo, hacemos uso de esta información visual en combinación con la odometría interna del robot para calcular un mapa híbrido topológico-métrico del entorno. Para ello, nos inspiramos en el enfoque de fastSLAM [10], pero con ciertos cambios relevantes. Combinaremos un algoritmo de localización

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Monte Carlo (MCL) con un proceso de estimación de marcas, de modo que el robot podrá decidir cuándo su posición actual se incluye como una nueva marca en el mapa métrico. Cada una de estas marcas será un descriptor de apariencia global de una escena (apartado 2.1).

3.1. ALGORITMO MONTE CARLO

El enfoque que hemos usado para implementar la localización del robot móvil está basado en un proceso Monte Carlo que presenta algunas diferencias con la formulación tradicional. El objetivo consiste en estimar la pose del robot $x_t = (x, y, \theta)$ en el instante t usando un conjunto de medidas $z_{1:t} = \{z_1, z_2, \ldots, z_t\}$ del entorno y de movimientos $u_{1:t} = \{u_1, u_2, \ldots, u_t\}$ del robot [4]. En la localización Monte Carlo [13], la función densidad de probabilidad $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$ se representa con un conjunto de M muestras aleatorias $\chi_t = x_t^i, i = 1 \ldots M$ denominadas partículas. Podemos interpretar cada partícula como una hipótesis de la verdadera posición del robot $x_t^i = (x^i, y^i, \theta^i)$. El conjunto de partículas define una función de probabilidad discreta que aproxima a la distribución continua, en la que el peso de cada partícula determina su importancia relativa.

El algoritmo Monte Carlo tradicional consta de tres fases: *Fase de predicción*, en la que se genera un conjunto de partículas $\overline{\chi_t}$ a partir del conjunto anterior χ_{t-1} y de la señal de control u_t; *Fase de actualización*, en la que se hace uso de la observación z_t para calcular el peso w_t^i de cada partícula en el conjunto $\overline{\chi_t}$ y *Fase de remuestreo*, en la que se calcula el conjunto resultante χ_t. Finalmente, el conjunto χ_t representa la distribución $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$. En nuestro caso (SLAM), dado que comenzamos el experimento sin disponer de un mapa del entorno, el conjunto inicial de partículas se representa por un conjunto de muestras tomadas a partir de una distribución Gaussiana estrecha centrada en la posición inicial $(x = 0, y = 0)$. Cuando el experimento comienza, la primera marca (l_0) corresponde con el descriptor de la escena capturado desde la primera pose del robot (X_0) y cuando el robot se mueve y captura una nueva imagen, el conjunto de partículas de la pose inicial también se mueve, añadiendo cierto error al movimiento de cada partícula, teniendo en cuenta el movimiento del robot $u_{1:t} = \{u_1, u_2, \ldots, u_t\}$.

Por su parte, el algoritmo topológico calcula la pose representativa del nodo cada vez que se añade una nueva imagen, y esta aparecerá en el mapa métrico como el conjunto de partículas que representa la localización métrica del nodo. Aunque se calcula cada conjunto de partículas que representa cada movimiento del robot, únicamente se añade al mapa métrico el conjunto de partículas que representa al nodo. La principal diferencia respecto al algoritmo MCL tradicional es que no llevamos a cabo un proceso de actualización y remuestreo en cada movimiento del robot, sino únicamente cuando el algoritmo topológico detecta un cierre de ciclo. Por otro lado, llevamos a cabo una fase de predicción en cada movimiento del robot.

El proceso de actualización y remuestreo se activa cuando se detecta un cierre de ciclo métrico. El peso de cada partícula $w_t^i = p(z_t|x_t^i)$ que representa la pose actual del robot (p_t) se calcula haciendo uso tanto de la información métrica (distancia métrica) como de la información visual (distancia en el espacio de la apariencia) a través de la siguiente expresión:

$$\omega_t^i = \exp\{-v_i \Sigma_l^{-1} v_i^T\} \exp\{-h_j \Sigma_d^{-1} h_j^T\} \qquad (3)$$

Donde v_i es la diferencia entre la posición de la marca l_j y la posición (x_i, y_i) de la partícula i $(v_i = (l_x^j, l_y^j) - (x^i, y^i))$. Σ_l es una matriz diagonal $\Sigma_l = diag(\sigma_l^2, \sigma_l^2)$ en la que se ha elegido la varianza σ_l^2 para minimizar el error en localización del robot. $h = |d_j - d_t|$ es la diferencia entre el descriptor de apariencia asociado con la imagen observada actualmente y el descriptor asociado con la marca l_j. El conjunto resultante χ_t se calcula mediante remuestreo con sustitución a partir del conjunto $\overline{\chi_t}$, donde la probabilidad de remuestrear cada partícula es proporcional a su peso w_t^i.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el propósito de evaluar nuestra propuesta de SLAM híbrido métrico-topológico, hemos llevado a cabo un experimento haciendo uso de un robot móvil en un entorno de laboratorio, bajo condiciones de trabajo reales. En primer lugar, hemos capturado los datos necesarios y, a continuación, hemos llevado a cabo varios conjuntos de experimentos, variando los principales parámetros del algoritmo, para tratar de ajustar los valores óptimos. La figura 1 muestra una vista en planta del entorno. Se trata de un entorno de trabajo real y desafiante, por el alto nivel de *aliasing visual* que presenta, por los cambios de iluminación y por el tránsito de personas que caminan cerca del robot. Se muestra la ruta seguida por el robot para capturar los datos necesarios para comprobar el desempeño de nuestro algoritmo (puntos verdes). También se muestran algunos ejemplos de imágenes capturadas a lo largo de esta ruta, y el punto inicial y final (punto azul grande). La ruta presenta varios cierres de ciclo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

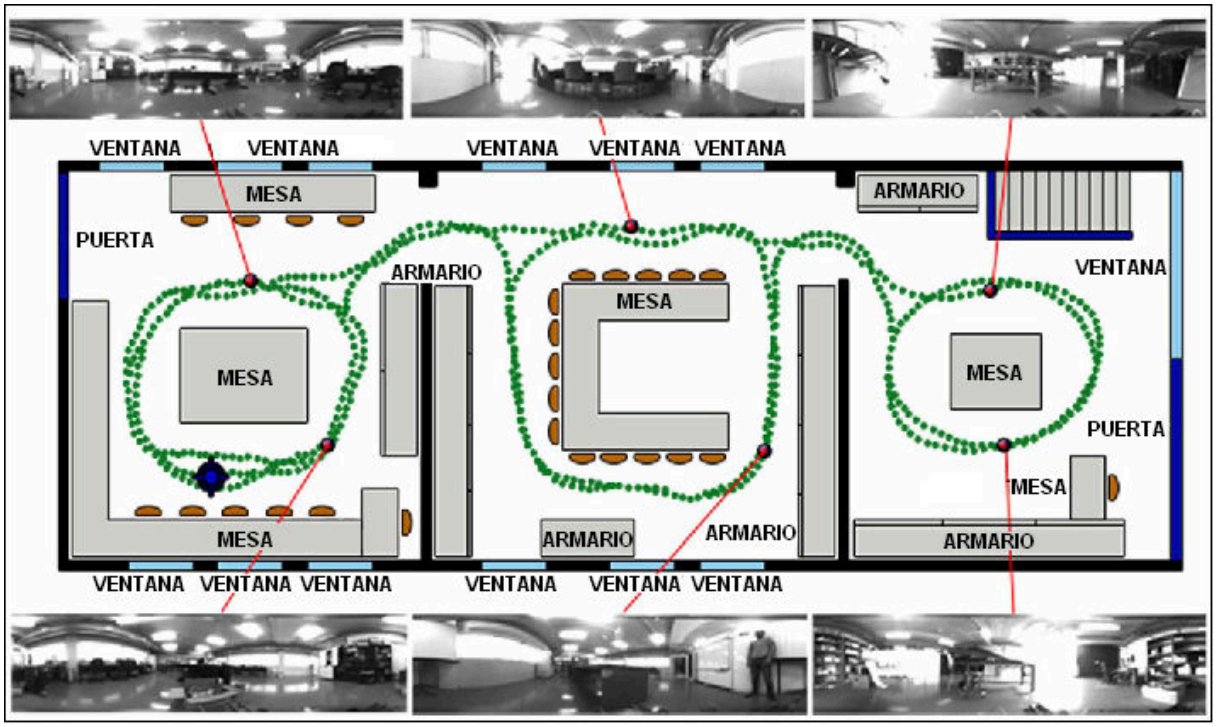


Figura 1: Vista en planta del entorno en que se han llevado a cabo los experimentos.

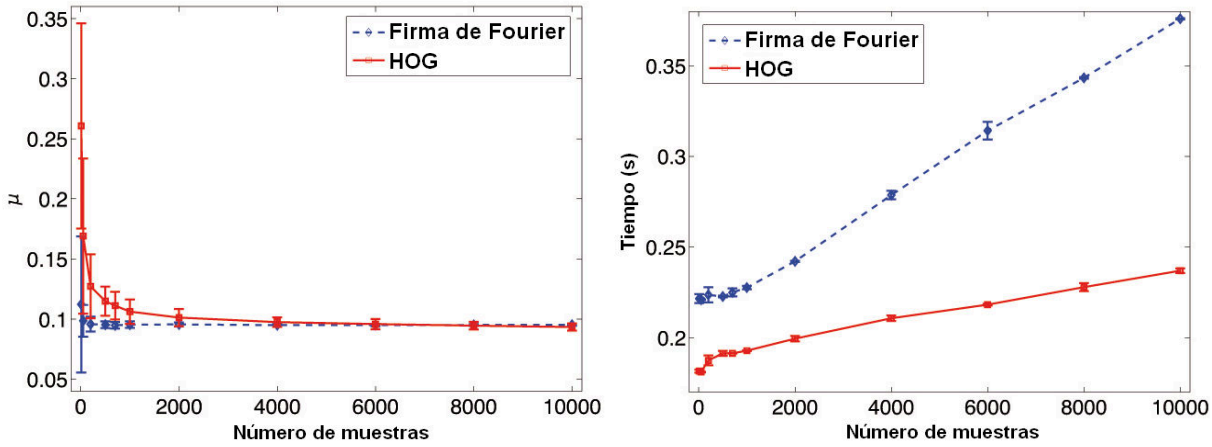
Para evaluar el desempeño del método, necesitamos un mecanismo que nos permita calcular cómo de similar es la forma del mapa resultante respecto a la forma del mapa real (trayectoria de la figura 1). Dado que comenzamos sin ningún conocimiento previo acerca de la forma del mapa real, esperamos que el mapa resultante tenga una forma similar al mapa real, salvo cierta rotación. Teniendo en cuenta este detalle, hemos decidido hacer uso del análisis de Procrustes [12] para comparar el mapa obtenido con el real. Este análisis nos proporciona una medida de similitud entre la forma del conjunto de *landmarks* obtenido tras el proceso de SLAM (conjunto A) y su distribución real (conjunto B). Como resultado del proceso, obtenemos un parámetro $\mu \in [0, 1]$, donde μ es una medida de la similitud de forma entre los conjuntos de puntos A y B, de modo que un valor pequeño de μ, indica que los conjuntos A y B son similares. En el presente trabajo llamaremos *diferencia de forma* al factor μ. Este análisis se realiza únicamente a efecto comparativos, para conocer el funcionamiento del algoritmo implementado, y se toma como referencia la ruta real (calculada a partir de medidas láser) seguida por el robot. Cabe destacar que en una aplicación real, se desconocería esta ruta real.

Usando como entrada el conjunto de datos adquirido previamente por el robot en el escenario real, hemos llevado a cabo una experimentación exhaustiva. Hemos implementado nuestro algoritmo haciendo uso de la odometría visual calculada y de dos descriptores distintos de apariencia visual global. La odometría visual se usa como entrada para la fase de predicción del algoritmo de localización Monte Carlo. En los experimentos hemos testado la influencia del número de partículas en la forma del mapa calculado. Hemos hecho uso de la diferencia de forma μ para evaluar la bondad del mapa resultante (métrico). En la figura 2 se muestra el factor μ y el tiempo por iteración t que requiere la ejecución del algoritmo, dependiendo del número de partículas tomadas en el algoritmo Monte Carlo. Se muestran los resultados obtenidos con ambos descriptores.

Como se puede apreciar en ambos casos, según incrementamos el número de partículas, la diferencia de forma disminuye. Sin embargo, alcanza un valor mínimo a partir del cual esta disminución es prácticamente inapreciable. En el caso de la Firma de Fourier, el valor mínimo que se obtiene para μ es igual 0,096 usando 2000 partículas. El el caso de HOG, el mínimo se obtiene cuando usamos 4000 partículas, y su valor es $\mu = 0{,}097$. Respecto al tiempo de cálculo, se trata de un factor importante puesto que indica si el proceso se podría llevara a cabo o no en tiempo real. Observamos como el tiempo por iteración se incrementa cuando lo hace el número de partículas.

Comparando ambos métodos de descripción, en general, en el caso de la Firma de Fourier, μ toma un menor valor que en el caso de HOG (excepto cuando tomamos un número muy alto de partícu-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) (b)

Figura 2: (a) Diferencia de forma μ según el número de partículas utilizando la Firma de Fourier (línea azul) y HOG (línea roja). (b) Tiempo de procesamiento por iteración durante la construcción de mapa dependiendo del número de partículas utilizando la Firma de Fourier (línea azul) y HOG (línea roja).

las, cuando μ es ligeramente mayor en el caso de la firma de Fourier). Por su parte, el tiempo siempre es menor cuando usamos como descriptor HOG, aunque cabe destacar que ambos descriptores nos permitirían trabajar en tiempo real manteniendo una buena precisión en el mapa generado si usamos un número de partículas intermedio, en torno a 2000.

La figura 3 muestra un ejemplo de resultado experimental obtenido al usar 2000 partículas y (a) la Firma de Fourier y (b) HOG. Las partículas que muestran la posición de las marcas se representan como puntos verdes, y la posición de estas marcas es representada como cruces azules. Las partículas que representan la posición actual del robot se muestran como puntos rojos y su posición es representada como un círculo verde. La odometría interna se representa con una línea azul en la que los cuadrados azules representan la posición actual del robot de acuerdo con la odometría interna. La odometría visual se representa como una línea roja en la que los cuadrados rojos representan la posición del robot según la odometría visual. Finalmente, la trayectoria real seguida por el robot (*ground truth*) se representa como una línea negra donde los cuadrados negros representan las posiciones del robot.

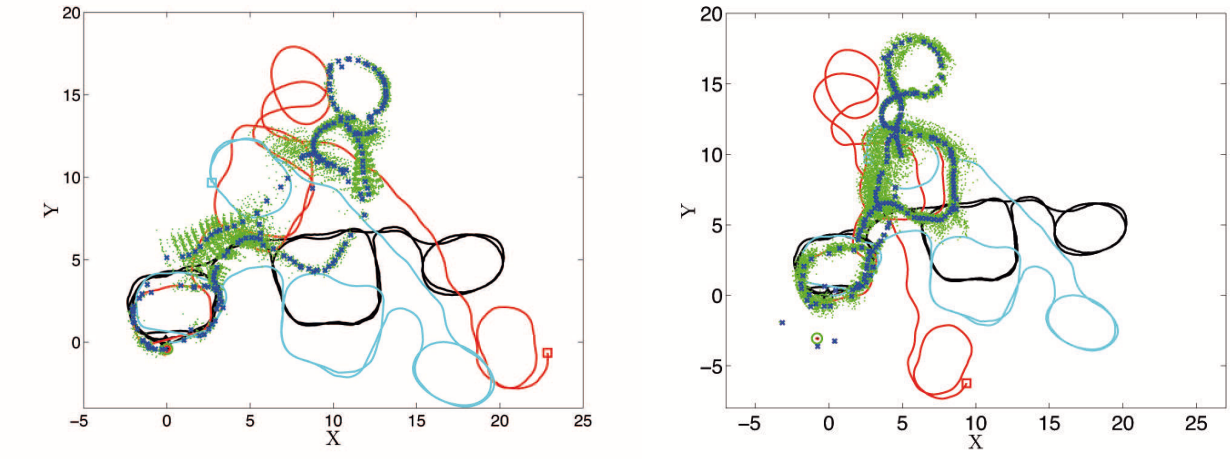
Estas figuras nos muestran como, en ambos casos, el mapa obtenido mediante el algoritmo propuesto es más preciso que el mapa obtenido haciendo uso únicamente de los datos de odometría interna del robot. Se puede apreciar además como, en el caso de la Firma de Fourier, la posición inicial y final del robot son prácticamente coincidentes en el mapa calculado con nuestro método, que es lo que ocurre en el mapa real. En el caso de HOG, aunque estas posiciones no coinciden, son más cercanas entre ellas que en el caso del mapa calculado con la odometría del robot.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo hemos presentado un método de SLAM visual. Para resolver este problema hemos hecho uso de la apariencia global de imágenes panorámicas en combinación con la odometría interna del robot. Hemos desarrollado un algoritmo híbrido métrico-topológico para construir el mapa métrico, para mantener un grafo topológico y para detectar los cierres de ciclo. Los experimentos se han llevado a cabo con un conjunto de escenas omnidireccionales capturadas mediante un sistema catadióptrico montado sobre el robot móvil en un entorno de trabajo interior real.

En los experimentos, hemos testado este enfoque híbrido, usando tanto la Firma de Fourier como Histograma de Orientación del Gradiente como descriptores de la apariencia global de las escenas. Cuando ajustamos correctamente los parámetros del algoritmo, conseguimos un mapa correcto con ambos tipos de descriptores. Además, los experimentos demuestran como necesitamos un número relativamente pequeño de partículas para conseguir una precisión aceptable en ambos casos. Hemos presentado resultados detallados de los experimentos realizados cuando usamos un número de partículas igual a 2000 con ambos descriptores. Estos resultados experimentales demuestran la validez del algoritmo. La precisión de la Firma

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) (b)

Figura 3: Ejemplo de un experimento usando un número de partículas igual a 2000 y descriptor (a) Firma de Fourier y (b) HOG.

de Fourier supera a los resultados obtenidos con HOG. Sin embargo, HOG requiere un menor coste computacional. Dado que ambos métodos nos permiten trabajar en tiempo real, llegamos a la conclusión de que la Firma de Fourier es el mejor de ambos métodos para resolver este tipo de tareas.

Los trabajos futuros incluirían el desarrollo de un nuevo método para extraer más información del proceso de muestreo cuando detectamos un cierre de ciclo, para intentar mejorar la precisión del mapa resultante. También sería necesario probar el funcionamiento del algoritmo en un entorno mayor, incluyendo escenas capturadas en exterior.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2010-15308: *Exploración Integrada de Entornos Mediante Robots Cooperativos para la Creación de Mapas 3D Visuales y Topológicos que Puedan ser Usados en Navegación con 6 Grados de Libertad.*

Referencias

[1] Amorós, F., Payá, L., Reinoso, Ó., Fernández, L., Marín, J.M., (2010) "Visual map building and localization with an appearance-based approach - comparisons of techniques to extract information of panoramic images". *ICINCO 2010, Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 423–426

[2] Amorós, F., Payá, L., Reinoso, Ó., Jiménez, L.M., (2012) "Comparison of global-appearance techniques applied to visual map building and localization". *VISAPP 2012 - Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. pp. 395–398

[3] Dalal, N., Triggs, B., (2005) "Histograms of oriented gradients for human detection". *CVPR 2005. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1, pp. 886–893

[4] Fox, D., Burgard, W., Thrun, S., (1999) "Markov localization for mobile robots in dynamic environments". *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*. 11, pp. 391–427

[5] Gil, A., Reinoso, O., Ballesta, M., Juliá, M., (2008) "Multi-robot visual SLAM using a rao-blackwellized particle filter". *Robotics and Autonomous Systems*. 58(1), pp. 68–80

[6] Lui, W.L.D., Jarvis, R., (2012) "A pure vision-based topological SLAM system". *International Journal on Robotics Research*. 31(4), pp. 403–428

[7] Lui, W., Jarvis, R., (2010) "A pure vision-based approach to topological SLAM". *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 3784–3791

[8] Menegatti, E., Maeda, T., Ishiguro, H., (2004) "Image-based memory for robot navigation using properties of omnidirectional images". *Robotics and Autonomous Systems*. 47, pp. 251–267

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[9] Paya, L., Fernandez, L., Reinoso, O., Gil, A., Ubeda, D., (2009) "Appearance-based dense maps creation. comparison of compression techniques with panoramic images". *Proc. of the Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 238–246

[10] Paya, L., Fernandez, L., Gil, A., Reinoso, O., (2010) "Map building and Monte Carlo localization using global appearance of omnidirectional images". *Sensors* 10(12), pp. 11468–11497

[11] Romero, A., Cazorla, M., (2010) "Topological SLAM using omnidirectional images: Merging feature detectors and graph-matching". *ACIVS 2010. Int Conf. on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. 6474, pp. 464–475

[12] Seber, G., (1984) Multivariate observations. Wiley Interscience

[13] Thrun, S., Fox, D., Burgard, W., Dellaert, F., (2000) "Robust Monte Carlo localization for mobile robots". *Artificial Intelligence* 128(1-2), pp. 99–141

[14] Tully, S., Kantor, G., Choset, H., (2012) "A unified Bayesian framework for global localization and SLAM in hybrid metric/topological maps". *International Journal on Robotics Research* 31(3), pp. 271–288

[15] Valgren, C., Lilienthal, A., (2007) "SIFT, SURF and seasons: Long-term outdoor localization ugin local features". *Proc. of the 3rd European Conference on Mobile Robots (ECMR)*

[16] Valiente, D., Fernandez, L., Gil, A., Payá, L., Reinoso, O. (2012) "Visual odometry through appearance- and feature-based method with omnidirectional images". *Journal of Robotics*. 2012

[17] Zhiwei, L., Xiang, G., Yanyan, C., Songhao, Z., (2013) "A novel loop closure detection method in monocular SLAM". *Intelligent Service Robotics*. 6(2), pp. 79–87

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

NORMA IEC-61499 PARA EL CONTROL DISTRIBUIDO. APLICACIÓN AL CNC.

Esteban Querol, Julio Ariel Romero, Antonio M. Estruch, Fernando Romero
Dep. Enginyeria de Sistemes Industrials i Disseny
Universitat Jaume I, Campus de Riu Sec, Castelló
equerol@uji.es, romeroj@uji.es, estruch@uji.es, fromero@uji.es

Resumen

En este artículo se exponen algunos conceptos y propuestas para el desarrollo de un prototipo que permita la investigación en el campo de los sistemas de fabricación flexibles aplicando la norma IEC 61499 para el desarrollo de sistemas de control distribuidos. Las ideas y conceptos descritos tienen en cuenta las características de dicha norma, así como las herramientas y tecnología que actualmente la soportan.

Palabras clave: CNCs adaptativos e inteligentes, control distribuido, IEC 61499

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el concepto de Bloque de Función (FB) ha estado cada vez más presente en la programación de sistemas de automatización y control industrial. A esto ha contribuido en gran medida el uso cada vez más extendido del estándar IEC 61131-3, que tiene a los FBs como uno de sus conceptos de programación básicos, [2].

Desde el punto de vista de la programación, un FB es una unidad de software en la que se encapsulan datos y código y que cuenta con entradas y salidas. A partir de un FB se pueden crear instancias, cada una de las cuales tendrá un comportamiento determinado, el cual dependerá de los datos internos almacenados en las instancia del FB y de sus entradas.

Las características antes comentadas de los FB han hecho que estos sean vistos como una herramienta efectiva para la automatización de sistemas de fabricación flexibles y reconfigurables, [7]. En este tipo de aplicaciones una instancia de FB puede encapsular parte de los datos de un proceso que se ejecutará en una máquina de mecanizado CNC, por ejemplo la operación de desbaste de una ranura, el acabado de una cajera o el taladrado de un agujero, generando diferentes salidas para las mismas entradas en función del estado de las variables internas que dependerán de las variables de la máquina o de los propios procesos de mecanizado (fuerzas, deflexiones, etc.).

Además del estándar IEC 61131-3, existe actualmente otra norma en el ámbito de la automatización industrial que considera a los FBs como pieza fundamental para la creación de aplicaciones. Se trata de la norma IEC 61499 para el desarrollo de sistemas de control distribuidos, [3]. Ello ha motivado que la aplicación de esta norma al control de sistemas de fabricación flexible esté siendo el foco de atención de numerosas investigaciones.

Este artículo es el resultado de los primeros pasos para el desarrollo de un prototipo que permita la investigación en el campo de los sistema de fabricación flexibles aplicando la norma IEC 61499. El prototipo se desarrolla en el marco de un proyecto de investigación *Desarrollo de sistemas holónicos para el control de procesos de fabricación complejos*, en el cual se pretende definir y desarrollar un sistema avanzado de control de procesos de fabricación que incorpore las últimas propuestas tecnológicas y estándares de comunicación e integración (protocolos y estándares de comunicación y los modelos de información) que se han desarrollado en los últimos años.

Una parte importante del artículo está dedicada a la norma IEC 61499, donde se describen sus características fundamentales desde un punto de vista conceptual y se presenta las distintas herramientas y tecnologías que permiten el desarrollo de aplicaciones basados en dicha norma. Finalmente describen las características e ideas fundamentales que se están teniendo en cuenta para el desarrollo del prototipo.

2. EL ESTÁNDAR IEC 61499

2.1. DEFINICIÓN

El estándar IEC 61499 es una arquitectura de referencia diseñada para facilitar el desarrollo de aplicaciones de control con lógica descentralizada [3, 5]. Para ello, propone una arquitectura basada en bloques funcionales (FB) que se definen como la unidad estructural básica de los modelos. Cada bloque se caracteriza por sus entradas, salidas y funciones internas, así al igual que ocurre con los diagramas de bloques clásicos, a partir de las en-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tradas y la definición del bloque (comportamiento interno) tendremos unas salidas. A través de la interconexión de bloques simples podemos conseguir modelar aplicaciones y modelos complejos. El estándar busca aprovecha los amplios conocimientos de los ingenieros en el desarrollo de los diagramas de bloques mediante esta forma de modelado.

Otra de las nociones básicas de este estándar, junto con la definición de bloque funcional, es la forma de ejecución de los FB. Los bloques funcionales no se ejecutan hasta que reciben una señal de entrada, así estos permanecen en un estado de reposo hasta que es necesaria su ejecución, a diferencia de los componentes de la IEC 61131, donde las subrutinas son verificadas periódicamente. Esta forma de ejecución tiene por objetivo la portabilidad y reutilización de los FB. Gracias a que cada FB tiene su propio contexto y es ejecutado sólo ante una demanda, podemos considerar que este se comporta como una unidad totalmente independiente del resto.

2.2. OBJETIVOS

El estándar busca conseguir un alto grado de control distribuido siendo este su principal objetivo. A diferencia de los otros estándares de control, más antiguos y no adecuados a los nuevos componentes (sistemas embebidos, PC industriales y redes más avanzadas) pueden ser utilizados para descentralizar la lógica de control y poder implantar controles holónicos o multiagente, que hagan los sistemas más flexibles. Además, la creciente importancia del software en el control hace que la reutilización de código sea vista como una cuestión fundamental. Es decir, poder diseñar un mismo software para dos máquinas que tienen que hacer lo mismo pero son de fabricantes diferentes.

Por estas razones, la arquitectura del IEC 61499 está fundamentada en la busca de tres aspectos clave, [1]:

- Portabilidad: La herramientas de software pueden aceptar e interpretar correctamente los componentes de software y las configuraciones del sistema creadas por diferentes herramientas de desarrollo.
- Configurabilidad: Cualquier dispositivo y su software puede ser configurado por las herramientas de desarrollo de diferentes vendedores.
- Interoperabilidad: Los dispositivos embebidos pueden trabajar juntos para realizar las funciones necesarias de las aplicaciones distribuidas.

2.3. ESTRUCTURA DEL ESTÁNDAR

En cuanto a la estructuración del estándar, este se encuentra distribuido en 4 partes, siendo cada una independiente de las otras y con objetivos diferentes. A continuación resumimos estas 4 partes y sus objetivos.

Parte 1: Define la arquitectura de referencia para el desarrollo, reutilización e implementación de los bloques funcionales. Se definen, entre otros, los conceptos de bloque funcional básico, bloque funcional compuesto, aplicación, interfaz, dato, señal evento...

Parte 2: En esta parte se definen los requisitos que deben cumplir las herramientas de desarrollo para poder desarrollar las arquitecturas propuestas en la parte 1. No obstante, los requisitos definidos no permiten por ellos mismo garantizar la interoperabilidad, portabilidad y la configurabilidad. Entre otras cosas, se definen los esquemas XML para el intercambio de ficheros entre las distintas herramientas.

Parte 3: Información didáctica que tiene por objeto mostrar las funcionalidades y ejemplos de aplicación de la IEC 61499 en un amplio conjunto de dominios.

Parte 4: El objetivo de esta parte es definir unos perfiles de compilación de forma que se puedan cumplir los objetivos de la norma IEC 61499 en los dispositivos compatibles y las herramientas de desarrollo.

2.4. DUALIDAD MODELO-IMPLEMENTACIÓN

Desde cierto punto de vista se puede ver la IEC 61499 como una forma de modelar aplicaciones de control a través del concepto de bloque funcional, ya que entre otras cosas nos permite la encapsulación de componentes (otros FB) y la visualización de las interconexiones entre componentes. De este modo podemos ver el sistema desde diferentes niveles de abstracción según el nivel de detalle necesario. Pero al mismo tiempo esta arquitectura también es una implementación del propio control, el modelo diseñado será implementado y ejecutado directamente. Esta dualidad puede resultar confusa a la hora de abordar este estándar, además la dependencia de ciertas partes del modelo, como los bloques funcionales de interfaz de servicio (SIFB) que dependen de la plataforma de ejecución pueden suponer una desventaja, ya que el modelo del sistema debería ser independiente de la plataforma.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3. MODELOS DE LA NORMA IEC 61499

En esta sección desarrollaremos algunos de los concepto clave para entender la arquitectura del estándar IEC 61499. Estos conceptos se encuentran definidos en la parte 1 del estándar y constituyen el esqueleto de la misma.

3.1. MODELO DE SISTEMA

El sistema es el elemento de mayor nivel que contempla esta arquitectura, engloba todos los dispositivos capaces de comunicarse y el conjunto de aplicaciones, así como las relaciones entre estos dos grupos. Desde el punto de vista del sistema, las aplicaciones son unitarias pero estas se pueden encontrar distribuidas entre los diferentes dispositivos del sistema, Figura 1, usando los mecanismos que el propio estándar define.

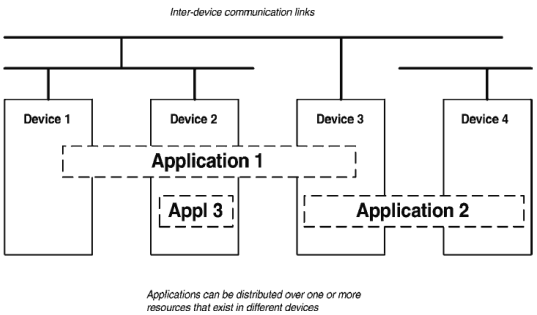


Figura 1: Modelo de sistema en la norma IEC 61499, [3].

3.2. MODELO DE DISPOSITIVO

El modelo de dispositivo que podemos ver en la Figura 2, representa la entidad física que va a ejecutar nuestra red de bloques funcionales. Lo podríamos asimilar a un sistema embebido o a un PC. El dispositivo es capaz de comunicarse con otros dispositivos o con sus periféricos a través de interfaces de comunicación. Al mismo tiempo es igualmente capaz de comunicar con la red de bloques funcionales a través de un interfaz de proceso.

3.3. MODELO DE RECURSO

Un recurso se puede definir como una parte del dispositivo designada a ejecutar un conjunto de bloques funcionales determinado, pertenecientes o no a la misma aplicación. El concepto de recurso podría ser visto como el conjunto de "recursos del dispositivo" dedicados exclusivamente al conjunto de bloques funcionales asignados a ese recurso. Cada recurso tiene la característica de ser

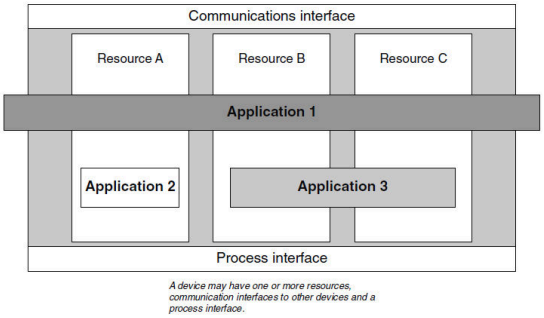


Figura 2: Modelo de dispositivo en la norma IEC 61499, [3].

independiente de los demás, esto implica que, un parte de los bloques funcionales que se están ejecutando en un determinado dispositivo se pueden parar, ejecutar o redefinir sin que esto afecte a los otros bloques definidos en el resto de recursos del dispositivo.

3.4. MODELO DE APLICACIÓN

Una aplicación es un conjunto de bloques funcionales interconectados entre si y unidos por un flujos de señales y datos. Las aplicaciones como hemos visto se pueden distribuir entre diferentes recursos, del mismo dispositivo o de dispositivos diferentes, Figura 3.

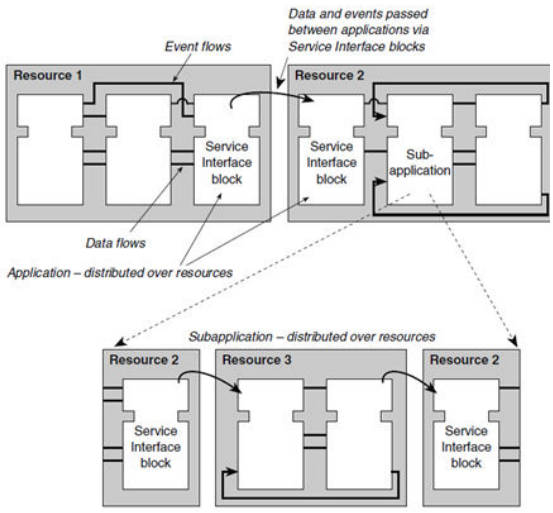


Figura 3: Modelo de aplicación en la norma IEC 61499, [3].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.5. MODELO DE BLOQUE FUNCIONAL

3.5.1. Interfaz, señales y datos

Como habíamos introducido previamente cada bloque funcional representa una unidad computacional independiente, cada bloque tiene su propio contexto de ejecución (variables) y sus algoritmos. Gráficamente, cada uno de estos bloques funcionales, independientemente de su tipo, se representa mediante un interfaz.

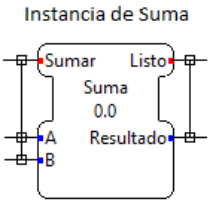


Figura 4: Ejemplo de interfaz de bloque funcional.

En la Figura 4, podemos ver dicho interfaz. En él se distinguen varias partes. En la parte superior se definen las señales de entrada, a la izquierda las de entrada y a la derecha las de salida.

En la parte central, se observa el tipo de bloque funcional, no hay que confundir el tipo con el nombre del bloque. El nombre del bloque lo podemos ver en la parte superior y fuera del mismo, en el ejemplo sería "instancia de Suma", este nombre nos permite identificar cada bloque concreto dentro de un esquema.

En la parte inferior podemos observar el flujo de datos, en la izquierda se representan los datos de entrada y en la derecha los de salida. Cada dato tiene un tipo y, al igual que ocurría con las señales, éste suele venir indicada al lado de la entrada/salida correspondiente. Finalmente, el último elemento que representamos gráficamente es el conector *WITH* que está formado por dos pequeños cuadrados y una línea que une algunas señales con uno o más datos. El *WITH* puede definirse como una asociación entre señales y datos, de forma que cuando se reciba o envíe una señal se actualizarán los registros de los campos datos asociados.

3.5.2. Bloque funcional básico

Una vez hemos definido el interfaz general de un bloque funcional, vamos a pasar ahora a explicar las características propias de un bloque funcional básico, que representa la unidad funcional de más bajo nivel a partir de la cual se construyen el resto. Concretamente nos centraremos en el análisis de su comportamiento interno.

En la Figura 5, podemos observar dicho FB. Aparte de las partes del interfaz que ya hemos comentado, el BFB se caracteriza por dos elementos que sólo posee él: el control de ejecución (ECC, execution control chart) y los algoritmos del propio bloque.

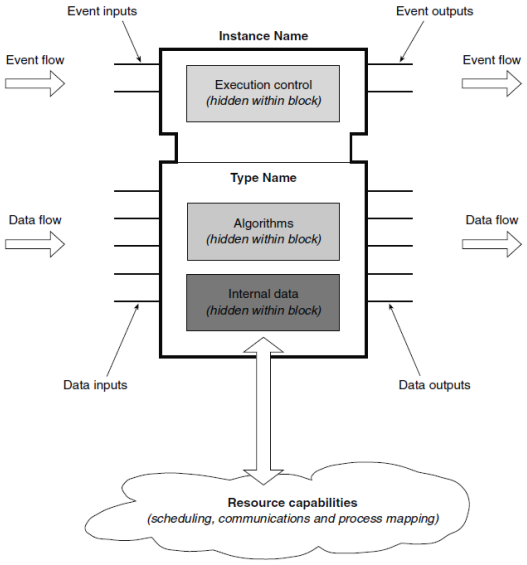


Figura 5: Interfaz de un bloque funcional básico en la norma IEC 61499, [3].

El ECC, representa el comportamiento interno del bloque, es decir, define como debe actuar el bloque ante un estímulo determinado (señal). La definición de la ECC es muy similar a la de una máquina de estados. Cada BFB contiene exactamente 1 ECC, no es posible definir más de uno por bloque.

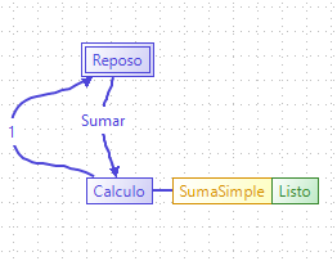


Figura 6: Execution control chart (ECC) del bloque Suma.

En la Figura 6 podemos observar un ejemplo de ECC, se trata del control de ejecución del bloque funcional "Suma" que hemos presentado anteriormente. Los rectángulos del ECC representan los estados en los que se puede encontrar el bloque, siendo el rectángulo con doble borde el estado de reposo por defecto. Si estando en un estado se recibe la señal de disparo correspondiente, el estado del bloque evoluciona al siguiente. Aunque no hay ninguna limitación formal, se recomienda limitar

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

el número de estados a un máximo de 4-5 para las aplicaciones más complejas.

Cada estado tiene asociado uno o más algoritmos que se ejecutarán cuando se entre en el estado. En el ejemplo anterior, el algoritmo "SumaSimple" se encuentra asociado con el estado "Calculo" de forma que tras recibir la señal "Sumar" el estado del bloque pasa a "Calculo" y se ejecuta el algoritmo "SumaSimple". Cuando el algoritmo se acabe de ejecutar, se generaran las señales de salida pertinentes. Estas se encuentran definidas en el ECC junto al algoritmo que las dispara.

En cuanto a la creación de los algoritmos hay que destacar que, el IEC 61499 no define el lenguaje en el que se tiene que programar y, por tanto, se puede ejecutar cualquier lenguaje que la implementación sea capaz de interpretar.

Además de los algoritmos y los ECC, un bloque básico posee otra característica propia, su contexto, que se puede definir como el conjunto de variables globales para todo el bloque. Las variables definidas en el contexto del bloque pueden ser usadas por todos los algoritmos del bloque pero en ningún caso serán accesibles para un elemento fuera de éste.

Finalmente, hay que resaltar que aunque el ECC se suele crear de forma gráfica, éste al igual que nos ocurría con el interfaz, también lo podemos definir textualmente.

Además de los BFB existe dos tipos más de FB:

Bloque funcional compuesto: Los bloques funcionales compuestos, CFB, por sus siglas en inglés son bloques funcionales compuestos de bloques funcionales básicos. Así, dentro de cada bloque compuesto podemos encapsular una cantidad ilimitada de bloques simples. El interfaz de cada bloque es idéntico al de un bloque simple, e igual al que hemos descrito previamente.

Bloque funcional de interfaz de servicio: Los bloques de interfaz de servicio, SIFB, son los encargados de gestionar las comunicaciones entre los bloques funcionales y el mundo exterior. Se encargan de proveer los servicios que los bloques necesitan a estos efectos, entre los servicios más comunes suelen estar la gestión (escritura y lectura) de entradas/salidas y la comunicación entre aplicaciones y recursos diferentes.

3.6. MODELO DE SUBAPLICACIÓN

El modelo de subaplicación puede verse como un modelo de bloque funcional compuesto distribuible. En efecto, las subaplicaciones son una red de bloques básicos, compuestos u otras subaplicaciones. Estas pueden distribuirse entre diferentes recursos, a diferencia de los bloques compuestos o los simples.

Sin embargo, una subaplicación nunca puede estar contenida dentro de un bloque compuesto, sólo pueden pertenecer a aplicaciones o a otras subaplicaciones. La asociación de señales es muy similar a la de los bloques compuestos pero con menos restricciones, se permite por ejemplo conectar una entrada directamente a una salida sin pasar por ningún bloque intermedio.

4. HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE LOS MODELOS

Como hemos introducido en la primera sección del presente documento, en la parte 2 de la norma se especifican las características que deben cumplir de las herramientas de desarrollo para lograr la interoperabilidad, uno de los principales objetivos de esta norma. A continuación presentamos brevemente las 4 herramientas de desarrollo más importantes y su grado de interoperabilidad.

4.1. FUNCTIONAL BLOCK DEVELOPMENT KIT (FBDK)

Este es el primer entorno de desarrollo que se creó, por uno de los miembro creadores del IEC 61499. Su principal objetivo era permitir la visualización de los FB, aunque con los años ha ido evolucionando y ahora permite además de representar, testear los bloques e intercambiarlos en forma de XML como se define en la parte 2 de la norma.

En cuanto a la herramienta, se encuentra desarrollada en java, posee un interfaz simple y poco amigable para el usuario. La aplicación aún tiene soporte y se distribuye de forma gratuita por la empresa Holoblocs. Inc. Los distribuidores sacan actualizaciones continuas para reflejar los constantes cambios y mejoras en la norma. Es capaz de exportar e importar desde 4DIAC y nxtStudio. En la Figura 7 se muestra una imagen del entorno de desarrollo de FBDK.

4.2. 4DIAC-IDE

4Diac es un entorno de desarrollo opersource extensible a través de plugins, basado el reconocido entorno de desarrollo Eclipse. La aplicación es muy robusta y muy intuitiva, tiene soporte oficial y saca dos actualizaciones del entorno por año. Permite la creación de bloques básicos, sistemas

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

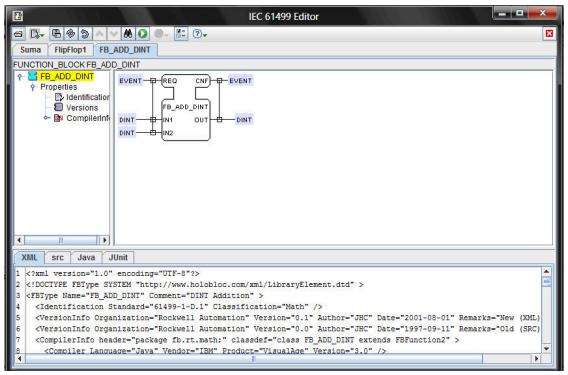


Figura 7: Entorno de desarrollo de FBDK.

aplicaciones y el resto de modelos. Además, permite distribuir muy fácilmente las aplicaciones entre diferentes recursos de forma gráfica. En las últimas versiones ha añadidos las funcionalidad de test y debug por medio de un display online que permite fijar y leer los valores de las variables de forma remota. Se ha demostrado su portabilidad con nxtStudio y con FBDK. En la Figura 8 se muestra una imagen del entorno de desarrollo de 4Diac.

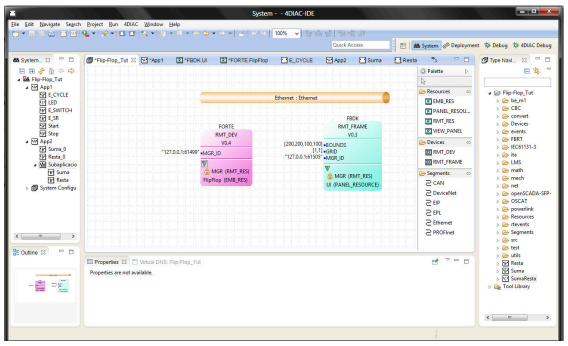


Figura 8: Entorno de desarrollo de 4DIAC-IDE.

4.3. NxtOne

Esta es una aplicación comercial desarrollada por la compañía nxtControl, que ofrece soporte para la norma IEC 61499, se ha utilizado en una multitud de dispositivos y máquinas de diferentes vendedores. Al igual que 4DIAC, es compatible con el resto de herramientas de desarrollo a excepción de ISaGRAF, además incluye funciones de debugging y de test. Posee un HMI para visualizar la ejecución a diferencia de 4DIAC. Por otra parte también incluye una funcionalidad CAT (Compound Automation Types) que nos aporta un conjunto de elementos de control prediseñados.

4.4. ISaGRAF

Al igual que nxtOne es una herramienta comercial desarrollada por la compañía ICE Triplex que pertenece a Rockwell automation. Esta herramienta soporta la IEC 61499 conjuntamente con la IEC 61131. Al igual que 4DIAC y nxtOne, tiene funcionalidades de debug y test y soporte oficial. Se ha utilizado en el desarrollo de muchas aplicaciones en componentes de diferentes vendedores. Uno de los grandes inconvenientes de esta herramienta es su incompatibilidad con el resto de plataformas de desarrollo.

5. PLATAFORMAS DE EJECUCIÓN

Como hemos definido previamente el IEC 61499 propone una arquitectura de referencia, un modelo pero no es una implementación. Una vez desarrollado el modelo de control distribuido necesitamos una plataforma de ejecución que se encargue ejecutar nuestro modelo. Esta plataforma de ejecución se encargará de interpretar y gestionar nuestro modelo, así definirá las reglas de ejecución de cada bloque y sus prioridades, es el encargado de suministrar el organizador de tareas o "task scheduling" que se ha introducido en la primera sección.

La plataforma de ejecución se encargara de gestionar el Hardware del dispositivo sobre el que se ejecuta nuestro modelo, entre otras cosas deberá gestionar la memoria, las comunicaciones y las entradas/salidas del dispositivo. A estos efectos podemos asimilar la plataforma de ejecución a un sistema operativo que se encarga de ejecutar nuestro programa.

Para poder ejecutar nuestro modelo, la plataforma deberá conocer todos los tipos de bloque funcional utilizados en él. Es decir, si hacemos nuestros propios tipos de bloques funcionales primero deberemos compilar una nueva versión de la plataforma de ejecución, a partir de los ficheros fuente donde habremos añadido nuestros tipos. Después podremos ejecutar la plataforma y enviar nuestro modelo, para finalmente poderlo ejecutar.

5.1. FUNTIONAL BLOCK RUNTIME (FBRT)

Este runtime fue el primero que se desarrolló junto a FBDK para poder testear y hacer las primeras demostraciones usando la norma IEC 61499. Esta desarrollado en java y tiene dos versiones diferentes. La primera se desarrolló en java embebido para poder ser utilizada en los dispositivos embebidos, no obstante cuando aparecieron otros runtime se dejó de desarrollar, entre toras cosas, por la dificultad de lograr un sistema tiempo real en java.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La otra versión no-embebida estaba desarrollada en java estándar y se puede ejecutar en cualquier dispositivo con JVM. Esta última versión sigue siendo evolucionada y presenta la ventaja respecto a otras de que tiene un HMI que permite visualizar los resultados. Es por esto que se sigue utilizando FBRT, especialmente para simular y depurar aplicaciones.

Además de FBDK, FBRT también puede ser configurado y utilizado por 4DIAC-IDE y nxtOne.

5.2. FORTE

Es una pequeña plataforma de ejecución implementada en C++ y de código abierto, desarrollada por el mismo equipo que 4DIAC. Esta especialmente desarrollada para ejecutarse en pequeños sistemas embebidos y sistemas de tiempo real, ya que tiene los mecanismos necesarios para poder asegurar la ejecución en tiempo real y la gestión de prioridades. Otro de los puntos fuertes de FORTE es que ha sido diseñada para ser independiente de la plataforma sobre la que se ejecute, para poder ser ejecutada en diferentes hardwares y sistemas operativos. En la actualidad FORTE se ha llevado a diferentes sistemas operativos como POSIX, windows32, threadX y eCos.

FORTE se puede configurar con 4DIAC pero también es compatible con otros entornos como FBDK o nxtOne.

5.3. ISaGRAF RUNTIME

A diferencia de las otras plataformas de ejecución que presentamos en este documento, este runtime no se ha desarrollado con el perfil de compilación propuesto por Holobloc, que es el que se ha adoptado como estándar, sino que usa su propio perfil de compilación. En consecuencia, ISaGRAF Runtime sólo se puede utilizar desde ISaGRAF y no existe interoperabilidad con las otras plataformas de ejecución.

Por otra parte, este runtime tiene ciertas características de ejecución que no cumple estrictamente con el IEC 61499, entre otras cosas no utiliza el modelo de ejecución basado en eventos. Es decir, en lugar de ejecutar un bloque solamente cuando llega la señal de entrada, ISaGRAF runtime utiliza un modelo más cercano a las subrutinas de 611131, y hace una verificación continua del estado de la entrada. Esta diferencia de comportamiento puede suponer una diferencia de ejecución respecto a las otras plataformas aunque, según los investigadores [6] las diferencias deberían ser mínimas en la mayoría de los casos.

5.4. nxtRT61499F

Esta plataforma de ejecución se basa en FORTE, ha sido modificada para incluir algunas funcionalidades adicionales y hacerla más eficiente. Pertenece a nxtControl y puede ser configurada tanto desde nxtOne como desde 4DIAC y FBDK. Se ha implantado en dispositivos de diferentes vendedores entre los que destacan SIEMENS o BOSCH [4].

6. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Para que el desarrollo de un sistema de control de una célula de mecanizado basado en FBs sea posible, es importante considerar la evolución de los CNCs en los últimos años. Una evolución que ha venido marcada por los avances en las arquitecturas de los sistemas de control numérico distribuidos y los CNC abiertos, una orientación que tiene por objetivo crear una plataforma de integración en la que los componentes de software puedan ser fácilmente integradas con el núcleo de la funcionalidades de un CNC.

Para nuestro prototipo se ha seleccionado un control abierto de nueva generación, en concreto el FAGOR 8070 OL, un sistema abierto basado en PC que corre bajo el Sistema operativo Windows XP embebido, puede controlar hasta cuatro cabezales y cuatro almacenes y posee grandes posibilidades de conectividad a través de la Ethernet y de los bus de campo Sercos, CANOpen y Mechatrolink.

En este prototipo las órdenes de ejecución de las operaciones de mecanizado son enviadas al CNC desde una red de FBs implementada en el runtime de Forte siguiendo la norma IEC 61499. Estos FBs se comunican con los distintos servidores del CNC utilizando la tecnología COM para enviar comandos, acceder a variables y recibir notificaciones. Por lo tanto, ha sido necesario desarrollar una capa de encapsulamiento de comunicaciones COM con los principales servidores del CNC. Sobre esta capa se han implementado FBs específicos del CNC formando parte del firmware. Su desarrollo ha sido complejo y ha requerido partir del código fuente C++ de Forte para desarrollar estos nuevos FBs específicos sobre la capa de comunicación COM que invoca a los servidores del CNC. La Figura 9 muestra la integración entre el runtime de Forte y el CNC 8070.

Otro aspecto importante es el tratamiento de eventos que ocurren en el CNC y que deben ser tratados correctamente por la red de FBs. Por ejemplo, el envío de órdenes de mecanizado al PLC

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

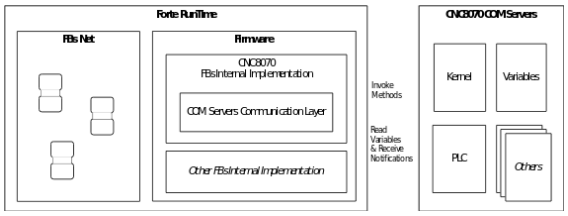


Figura 9: Integración entre el runtime de Forte y el CNC 8070.

sólo es posible cuando el PLC levanta la señal CYStart. Esta situación provoca una notificación que da luz verde al envío por parte de un FB de un bloque de órdenes en el lenguaje ISO al CNC. La ejecución de las operaciones de mecanizado no es inmediata y la finalización de la ejecución de las mismas sólo se detecta por un cambio en las variables de estado del CNC. Estos cambios en las variables de estado generan a su vez eventos que deben ser tratados por los FBs para continuar con la ejecución de las siguientes operaciones. La Figura 10 muestra de forma simplificada la ejecución de la operación de fresado de una cajera (pocket) utilizando FBs.

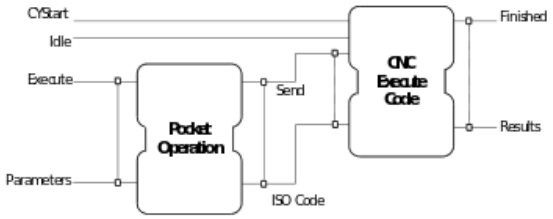


Figura 10: Ejecución de la operación de fresado de una cajera.

7. CONCLUSIONES

El estándar IEC 61499 aporta a los desarrolladores de software de control una arquitectura de referencia para poder diseñar más fácilmente las aplicaciones de control distribuido, gracias a esta arquitectura es posible llegar a implantar controles holónicos o multi-agente que hasta ahora permanecían en un plano teórico. Las posibilidades y ventajas de adoptar este tipo de arquitectura son múltiples y variadas, ente otras, podríamos destacar la capacidad de pasar del diseño a la implementación de forma directa, a través del toolchain apropiado, o la capacidad de usar dispositivos embebidos y PCs para el control.

Actualmente existe numerosas herramientas y tecnología que permiten la aplicación de la norma IEC 61499 al caso de los CNC distribuidos. En ese sentido, la existencia de los CNC abiertos permiten de forma efectiva la integración de aplicaciones desarrolladas bajo el paradigma IEC 61499 con las funcionalidades básicas de un control CNC, posibilitando el desarrollo de CNCs adaptables e inteligentes. Unos CNCs que además, al programarse mediante FBs pueden integrarse en un sistema de control distribuido basado basados en esta misma tecnología. Una opción que puede mejorar la flexibilidad, por ejemplo a nivel de rutas y secuencias, de los que los actuales Sistemas de Fabricación Flexible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto P1.1B2012-60 Plan de Promoción de la Investigación de la Universitat Jaume I del año 2012.

Referencias

[1] Julien Chouinard and Robert Brennan. Software for Next Generation Automation and Control. In *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 886–891. IEEE, August 2006.

[2] John Karl-Heinz and Michael Tiegelkamp. *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems - Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming System, Aids to Decision-Making Tools.* 2001.

[3] Robert W. Lewis. *Modelling Control Systems Using IEC 61499. Applying function blocks to distributed systems.* The Institution of Engineering and Technology, 2001.

[4] Valeriy Vyatkin. IEC 61499 as Enabler of Distributed and Intelligent Automation: State-of-the-Art Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4):768–781, November 2011.

[5] Valeriy Vyatkin. Software Engineering in Industrial Automation: State of the Art Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, (c):1–1, 2013.

[6] Valeriy Vyatkin and Julien Chouinard. On comparisons of the ISaGRAF implementation of IEC 61499 with FBDK and other implementations. In *2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 289–294. IEEE, July 2008.

[7] Hongqiang Wang, Xun Xu, and J. Des Tedford. An adaptable cnc system based on stepnc and function blocks. *International Journal of Production Research*, 45(17):3809–3829, 2007.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MPC tuning in a hierarchical control structure for a wastewater treatment process

Ignacio Santín
Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain, Ignacio.Santin@uab.cat
Carles Pedret; Ramon Vilanova
Carles.Pedret@uab.cat; Ramon.Vilanova@uab.cat

Abstract

This paper presents a MPC tuning in a two-level hierarchical control structure for biological wastewater treatment plants, with the goal of improving effluent quality and reducing operational costs. The Benchmark Simulation Model No.1 is used as working scenario. The hierarchical structure allows to adjust the dissolved oxygen in the fifth tank (DO5) according with the working conditions, instead of keeping it in a fixed value. MPC with inlet flow rate feedforward control (MPC+ FF) is proposed for the low level to control nitrate nitrogen concentration of the second tank (NO2) and DO5. MPC is tested for the high level to adjust the DO5 setpoint of the low level based on the ammonium and ammonia nitrogen concentration in the fifth tank (NH5). Modifying the tuning parameters of the high level MPC, a tuning region is determined, in which the effluent quality and operational costs are simultaneously improved in comparison with low level control alone.

Keywords: Wastewater Treatment Process, BSM1 Benchmark, Model Predictive Control, Hierarchical Control.

1 Introduction

Biological wastewater treatment plants (WWTPs) are complex, nonlinear systems with very different time constants. The intricate behaviour of the microorganisms and the large disturbances in concentrations and flow rates of the influent makes the control of the WWTP a complex task. In addition, there are effluent requirements defined by the European Union (European Directive 91/271 Urban wastewater) with economic penalties. The purpose of this work is to operate WWTPs with the aim of improving the effluent quality and reducing operational costs.

Many control strategies have been proposed in the literature but their evaluation and comparison, either practical or based on simulation is difficult. This is due to the variability of the influent, the complexity of the biological and biochemical phenomena, the large range of time constants (varying from a few minutes to several days), and the lack of standard evaluation criteria (among other things, due to region specific effluent requirements and cost levels). In order to face this complexity, the evaluation and comparison of the different strategies can be based on the Benchmark Simulation Model 1 (BSM1), developed by the International Association on Water Pollution Research and Control ([1]; [3]). This benchmark includes a plant layout, influent loads, test procedures and evaluation criteria.

For the challenging task of controlling WWTPs, Model Predictive Control (MPC) has demonstrated to be effective: [7] tried an indirect control, with the dissolved oxygen concentration in the fifth tank (DO5) as controlled variable; [10] tested a direct control, with the quality indices as controlled variables, with feedforward control of the influent flow rate to reject disturbances; [11] applied also quality indices as controlled variables with feedforward control of the influent ammonium and ammonia nitrogen concentration (NH) and flow rate, and in addition experimented with hard constraints in the manipulated variables and soft constraints in the controlled variables; [5] employed a multivariable control strategy with two controlled variables, DO5 and nitrite and nitrate nitrogen concentration of the second tank (NO2), with feedforward control of nitrite and nitrate nitrogen (NO) and dissolved oxygen (DO) concentrations in the inlet flow of the first anoxic reactor, improving the performance of NO2 control, but not of DO5 control in comparison with default PI controllers.

Other works have experimented in the NH in the fifth tank (NH5) control by manipulating DO5 set point. [15] tested with PI controllers and [12] experimented with PI controllers and a MPC. Both references worked with a variation of BSM1.

This paper proposes a range of an MPC tuning for the high level in a hierarchical control structure, in which effluent quality and operational costs are simultaneously improved in comparison with default control strategy. First an MPC with inlet flow rate feedforward (MPC + FF) is implemented as low level to control NO2 and DO5 by manipulating the oxygen transfer coefficient (K_La) in the fifht tank and the internal recirculation flow rate (Q_{rin}), based upon the work [5]. However, in this work, a different feedforward control is proposed and an improvement of DO5 and NO2

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

performance control is achieved in comparison with default PI controllers.

Next, the high level is implemented, which modifies DO5 set point of the low level according with the working conditions of the plant. For the MPC of the high level is obtained a tuning region by trade-off representations, in which the results show a simultaneously improvement of the effluent quality and operational costs for the three weather conditions: dry, rain and storm.

2 Working Scenario: BSM1

This section provides a description of the working scenario provided by the BSM1 as well as the cost/performance evaluation criteria and indexes.

2.1 Models

The processes in the WWTPs are simulated by two internationally accepted models. The Activated Sludge Model No 1 (ASM1) ([6]) for biological processes in the reactors and the double-exponential settling velocity model ([13]) for the vertical transfers between layers in the settler. The two models include thirteen state variables. Eight different biological processes are considered in the ASM1 and none in the settler.

2.2 Plant layout

The schematic representation of the WWTPs is presented in Fig. 1. The plant consists in five biological reactor tanks connected in series, followed by a secondary settler. The first two tanks have a volume of 1000 m^3 each and are anoxic and perfectly mixed. The rest three tanks have a volume of 1333 m^3 each and are aerated. The settler has a total volume of 6000 m^3 and is modeled in ten layers, being the 6th layer, counting from bottom to top, the feed layer. Two recycle flows, the first from the last tank and the second from the underflow of the settler, complete the system.

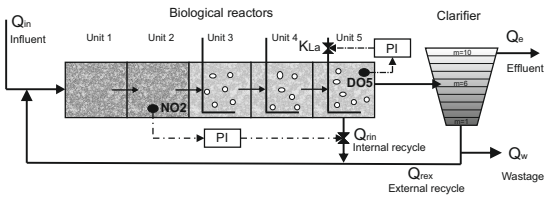


Figura 1: Benchmark Simulation Model 1

The plant is designed for an average influent dry-weather flow rate of 18.446 m^3/d and an average biodegradable chemical oxygen demand (COD) in the influent of 300 g/m^3. Its hydraulic retention time, based on average dry weather flow rate and total tank and settler volume (12000 m^3), is 14.4 h. The wastage flow rate (Q_w) equals 385 m^3/d, which corresponds to a biomass sludge age of about 9 days, based on the total amount of biomass present in the system.

The nitrogen removal is achieved using a denitrification step performed in the anoxic tanks and a nitrification step carried out in the aerated tanks. The internal recycle is used to supply the denitrification step with NO.

2.3 Influent loads

A particular control strategy may react well to a disturbance and not so well to another. To carry out a complete evaluation it is necessary to define a series of disturbances and to subject each control strategy to all the disturbances.

Three influent disturbances, representative of different weather conditions, have been defined in BSM1, [2, 14]: dry weather, rain weather (a combination of dry weather and a long rain period) and storm weather (a combination of dry weather with two storm events). Each scenario contains 14 days of influent data with sampling intervals of 15 minutes.

2.4 Evaluation criteria

A simulation/experiment protocol is established to assure that results and performance are got under the same conditions and can be compared. So first a 150 days period of stabilization in closed-loop using constant influent data with no noise on the measurements has to be completed to drive the system to a steady-state, next run a dynamic simulation by using the dry weather file (14 days) and finally testing the desired influent data (dry, rain or storm).

The effluent concentrations of Total Nitrogen (N_{tot}), Total Chemichal Oxygen Demand (COD_t), NH, Total Suspended Solids (TSS) and Biological Oxygen Demand (BOD_5) over the three evaluation periods (dry, rain and storm weather: 7 days for each) should obey the limits given in Table 1.

Variable	Value
N_{tot}	< 18 g N.m^{-3}
COD_t	< 100 g COD.m^{-3}
NH	< 4 g N.m^{-3}
TSS	< 30 g SS.m^{-3}
BOD_5	< 10 g BOD.m^{-3}

Tabla 1: Effluent quality limits

N_{tot} is calculated as the sum of NO and NKj, where NKj is the Kjeldahl Nitrogen concentration which is

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

the sum of organic nitrogen and NH.

The performance assessment is made at two levels. The first level concerns the control. Basically, this serves as a proof that the proposed control strategy has been applied properly. It is assessed by ISE (Integral of the Squared Error) criterion.

$$ISE = \int_{t=7days}^{t=14days} e_i^2 \cdot dt \quad (1)$$

where e_i is the error in each sample between the set point and the measured value.

The second level provides measures for the effect of the control strategy on plant performance. It includes the Effluent Quality Index and the Operational Cost Index that are explained next.

2.4.1 Effluent quality index

An Effluent Quality Index (EQI) is defined to evaluate the quality of the effluent. It is related with the fines to be paid due to the discharge of pollution. EQI is averaged over a 7 days observation period and it is calculated weighting the different compounds of the effluent loads.

$$EQI = \frac{1}{1000 \cdot T} \int_{t=7days}^{t=14days} (B_{TSS} \cdot TSS(t) + B_{COD} \cdot COD(t) + \\ + B_{NKj} \cdot NK_j(t) + B_{NO} \cdot NO(t) + B_{BOD_5} \cdot BOD_5(t)) \cdot Q(t) \cdot dt \quad (2)$$

where B_i are weighting factors (Table 2) and T is the total time.

Factor	B_{TSS}	B_{COD}	B_{NKj}	B_{NO}	B_{BOD_5}
Value(g pollution unit g^{-1})	2	1	30	10	2

Tabla 2: B_i values

2.4.2 Overall cost index

The overall cost index (OCI) is defined as:

$$OCI = AE + PE + 5 \cdot SP + 3 \cdot EC + ME \quad (3)$$

where AE is the aeration energy, PE is the pumping energy, SP is the sludge production to be disposed, EC is the consumption of external carbon source and ME is the mixing energy.

The aeration energy AE is calculated according to the following relation:

$$AE = \frac{S_o^{sat}}{T \cdot 1.8 \cdot 1000} \int_{t=7days}^{t=14days} \sum_{i=1}^{5} V_i \cdot K_L a_i(t) \cdot dt \quad (4)$$

where K_La is the oxygen transfer coefficient.

The pumping energy PE is calculated as:

$$PE = \frac{1}{T} \int_{7days}^{14days} (0.004 \cdot Q_{in}(t) + 0.008 \cdot Q_{rin}(t) + \\ + 0.05 \cdot Q_w(t)) \cdot dt \quad (5)$$

where Q_{in} is the influent flow rate, Q_{rin} is the internal recirculation flow rate and Q_w is the wastage flow rate.

The sludge production to be disposed SP is calculated from the total solid flow from wastage and the solids accumulated in the system over the period of time considered:

$$SP = \frac{1}{T} \cdot (TSS_a(14days) - TSS_a(7days) + TSS_s(14days) - \\ - TSS_s(7days) + \int_{t=7days}^{t=14days} TSS_w \cdot Q_w \cdot dt) \quad (6)$$

where TSS_a is the amount of solids in the reactors, TSS_s is the amount of solids in the settler and TSS_w is the amount of solids in the wastage.

The consumption of external carbon source EC refers to the carbon that could be added to improve denitrification.

The mixing energy ME is a function of the compartment volume and is the energy employed to mix the anoxic tanks to avoid settling:

$$ME = \frac{24}{T} \int_{t=7days}^{t=14days} \sum_{i=1}^{5} [0.005 \cdot V_i \; if \; K_L a_i(t) < 20 d^{-1} \\ otherwise \; 0] \cdot dt \quad (7)$$

where V is the volume of the tank.

3 Two Level Hierarchical Control strategy

The original BSM1 definition includes the so called default control strategy that is commonly used as a reference ([1]; [3]). This strategy uses two PI control loops as it can be seen in Fig. 1. The first one involves the control of DO5 by manipulating K_La. The set point for DO5 is 2 mg/l. The second control loop has to maintain NO2 to a set point of 1 mg/l by manipulation of Q_{rin}.

In this work a two-level hierarchical control scheme is proposed. The low level controller is responsible of following the set points by manipulating K_La and Q_{rin}. The high level controller has to manipulate DO5 set point of the low level controller according with NH5 (see Fig. 2). When NH is higher, more DO is needed for nitrification. On the contrary, when NH is lower, less DO is required, producing less NO. Other works have experimented in the NH5 control by manipulating DO5 set point ([15], [12]). Nevertheless, these investigations use default PI controllers at the low level.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[15] tested a high level PI controller, and [12] experienced with PI and MPC controllers as high level (working with a variation of BSM1, with one anoxic tank and four aerobic tanks).

In this paper, first, the two PI controllers are replaced by MPC + FF with the objective to get a better DO5 and NO2 set points tracking. Subsequently, an MPC is also implemented for the high level to manipulate DO5 set point based on NH5, and a range of tuning parameters are proposed.

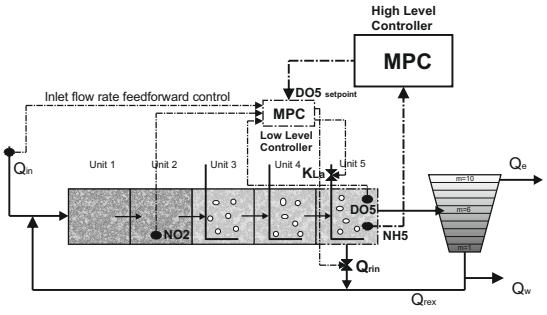


Figura 2: BSM1 with MPC + FF and Hierarchical control

3.1 MPC configuration

The basis of MPC is the use of an optimization algorithm to solve the control problem and the use of a model of the plant to make predictions of the output variables ([9]). At each control interval, $\triangle t$, for a prediction horizon, p, and a control horizon, m, ($m < p$), the MPC algorithm computes the sequences of control moves over the horizon m:

$$\triangle u(k), \triangle u(k+1), ..., \triangle u(k+m-1) \tag{8}$$

This sequence of control moves is based on predictions of the process variables over a future horizon p (see Fig. 3):

$$\hat{y}(k+1|k), \hat{y}(k+2|k), ..., \hat{y}(k+p|k) \tag{9}$$

and is selected in such a way that minimizes a quadratic objective of the form:

$$J = \sum_{l=1}^{p} ||\Gamma_y[y(k+l|k) - r(k+l)]||^2 + \\ + \sum_{l=1}^{m} ||\Gamma_{\triangle u}[\triangle u(k+l-1)]||^2 \tag{10}$$

where the output prediction $y(k+l|k)$ means a predicted controlled output for the future sampling instant $k+1$, performed at the current instant k, and Γ_y and $\Gamma_{\triangle u}$ are the output weight and input rate weight respectively, that penalize the residual between the future reference and the output variable prediction, and

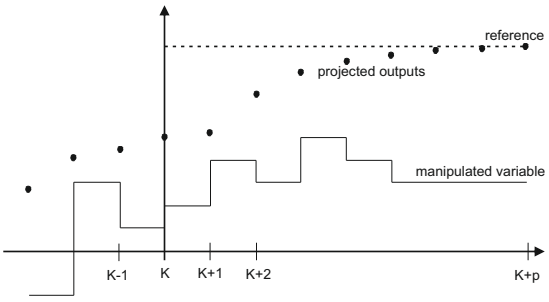


Figura 3: Model Predictive Control performance

the control moves. Due to the presence of strong disturbances on WWTPs, MPC has difficulties in keeping the controlled variables at their reference level. To compensate the disturbances, a feedforward control is added for the low level MPC, as in [4], [10], [11] and [5]. Different variables have been considered for the feedforward action in those works, but in our case the influent flow rate has been selected for its better results.

The MPC algorithm requires a state-space linear model to foresee how the plant outputs, $y(k)$, react to the possible variations of the control variables, $u(k)$, and to compute at each $\triangle t$ the control moves. WWTPs are nonlinear systems, but his operation can be approximated in the vicinity of a working point by a continuous-time state-space model as:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \tag{11}$$

where $x(k)$ is the state vector, and A, B, C and D are the state-space matrices. In concrete terms, $u_1(k)$ is Q_{rin}, $u_2(k)$ is K_La, $u_3(k)$ is Q_{in} and $y_1(k)$ is NO2 and $y_2(k)$ is DO5.

The tuning parameters are: $\triangle t$, m, p, $\Gamma_{\triangle u}$, Γ_y and the overall estimator gain.

- $\triangle t$ has a significant effect on the effectiveness of the controller. High $\triangle t$ can give less controller performance, mainly when there are important input disturbances, and low $\triangle t$ can produce too rapid changes in the actuators and high energy consumption.
- Lower $\Gamma_{\triangle u}$ or high Γ_y give better performance of the controlled variable, otherwise could produce strong oscillations in the actuators that must be avoided.
- m and p should be adjusted depending of system control in each case. However too high values can increase the computational time too much, and on the other hand, too small values may result in oscillatory responses or may not work at all.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- At each $\triangle t$ the controller compares the real value of the outputs with the expected values. The difference can be due to noise, to measurements errors and to unmeasured disturbances. With the overall estimator gain parameter it is determined the percentage of this difference that is attributed to unmeasured disturbances and the calculation matrix is consequently adjusted. Higher overall estimator gains improve the results, but too high values can make the controller unfeasible.

4 Simulation Results

In this section the control configurations proposed in the above section are tested and compared. Ideal sensors have been considerated for the simulations.

4.1 Low Level. MPC + FF configuration

DO5 and NO2 values to get the linear model have been obtained by varying K_La around $\pm 10\%$ of 131.6514 day^{-1} and Q_{rin} around $\pm 10\%$ of 16486 m^3/day and applying a step of $+50\%$ to Qin.

By using Matlab System Identification Toolbox with prediction error method ([8]), the following third order state-space model (11) is obtained:

$$A = \begin{bmatrix} 0.8748 & 0.04463 & 0.1314 \\ 0.04091 & 0.7331 & 0.1796 \\ 0.2617 & -0.1318 & 0.3007 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 7.641 \cdot 10^{-6} & 0.004551 & -2.749 \cdot 10^{-5} \\ -2.631 \cdot 10^{-5} & 0.006562 & -4.551 \cdot 10^{-6} \\ -9.63 \cdot 10^{-6} & -0.02161 & 2.447 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} 0.8812 & -0.5948 & 0.02114 \\ 1.187 & 0.9893 & -0.3754 \end{bmatrix}$$
$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

The selected values to tune the MPC are m=5 and p=20. It should be noted that these values are not critical and they can slightly be changed with similar results. $\triangle t$ is 0.00025 days (21.6 seconds). The followings weights have been used for DO5 control: $\Gamma_y = 1$, $\Gamma_{\triangle u} = 0.01$, and for NO2 control: $\Gamma_y = 1$, $\Gamma_{\triangle u} = 0.0001$. The selected overall estimator gain value is 0.8. Trial-and-error method was used for the identification of these parameters.

Fig. 4 shows DO5 and NO2 for the dry weather case compared with the default PI control. Table 3 shows that MPC + FF reduces ISE of NO2 control more than 99% and ISE of DO5 control more than 97% in comparison with the default PI controllers. This control performance improvement results in a 1.1% of EQI reduction, keeping a similar OCI (increase of 0.0063%).

This comparison is also done for the rain (see Fig. 5 and Table 3) and storm influents (see Fig. 6 and Table 3), obtaining similar percentages of improvement: ISE 99.6% (rain) and 99.5% (storm) for NO2 control and 92.02% (rain) and 90.8% (storm) for DO5 control, and reducing EQI with MPC + FF 1.03% for rain and 1.09% for storm. OCI is similar, increasing a 0.037% for rain and 0.044% for storm; nevertheless this difference is not significant.

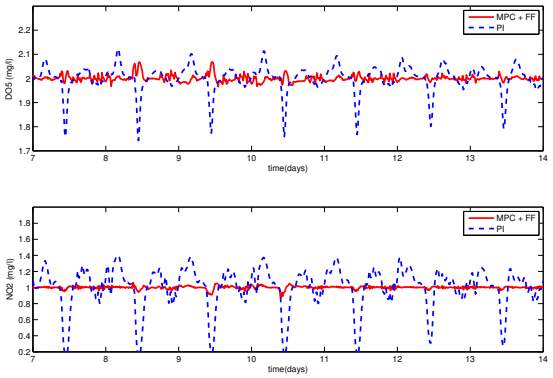


Figura 4: Dry influent: Control performance of DO5 and NO2 with default PI controllers and with MPC + FF

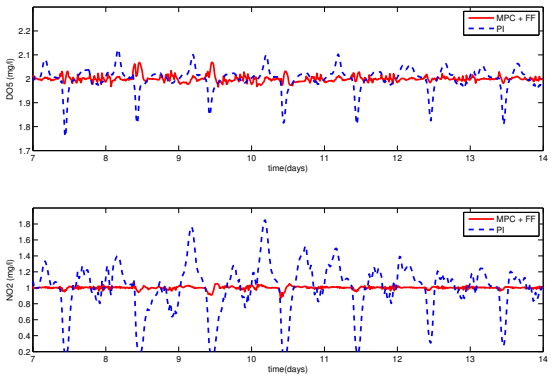


Figura 5: Rain influent: Performance control of DO5 and NO2 with default PI controllers and with MPC + FF

4.2 High Level. MPC tuning

For the hierarchical control structure, OCI and EQI trade-off representations have been made for the three weather conditions. OCI and EQI results are obtained assessing the extreme points where the best EQI without increasing OCI and the best OCI without increasing EQI are achieved compared to MPC + FF alone.

In order to identify the linear model, NH5 has been determined by varying DO5 set point around 2 mg/l,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

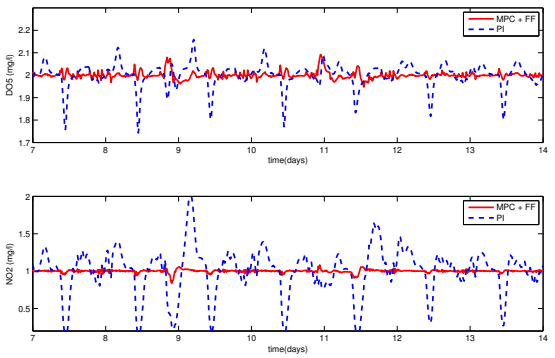


Figura 6: Storm influent: Performance control of DO5 and NO2 with default PI controllers and with MPC + FF

Dry weather			
	PI	MPC + FF	%
ISE (NO2 control)	0.47	0.0013	-99.7%
ISE (DO5 control)	0.022	0.00067	-96.9%
EQI (kg pollutants/d)	6115.63	6048.25	-1.1%
OCI	16381.93	16382.97	+0.0063%
Rain weather			
	PI	MPC + FF	%
ISE (NO2 control)	0.69392	0.002819	-99.6%
ISE (DO5 control)	0.016362	0.0013026	-92.02%
EQI (kg pollutants/d)	8174.98	8090.29	-1.03%
OCI	15984.85	15990.85	+0.037%
Storm weather			
	PI	MPC + FF	%
ISE (NO2 control)	0.69392	0.002819	-99.6%
ISE (DO5 control)	0.016362	0.0013026	-92.02%
EQI (kg pollutants/d)	8174.98	8090.29	-1.03%
OCI	15984.85	15990.85	+0.037%

Tabla 3: ISE, EQI and OCI results using default PI controllers and MPC + FF for dry, rain and storm influents

with maximum values of $\pm 10\%$.

By using a prediction error method, a second order state-space model (11) is obtained, as:

$$A = \begin{bmatrix} 0.2531 & 0.3691 \\ 0.2781 & -0.2695 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0.4507 \\ -0.1712 \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} 0.08655 & -0.01681 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

The following tuning parameters have been selected: $\triangle t$=0.035 days (50.4 minutes), m=2, p=10. To determine $\Gamma_{\triangle u}$ and NH5 set point values, a trade-off representation for OCI and EQI is provided and showed in Fig. 7. Every line corresponds to the results obtained for different $\Gamma_{\triangle u}$ (0.1, 0.05, 0.01 and 0.001), and the points marked with crosses are the results for a range of NH5 set point values, from 0.5 to 6.5 with increments of 0.25.

The results with MPC + FF alone and with default PI

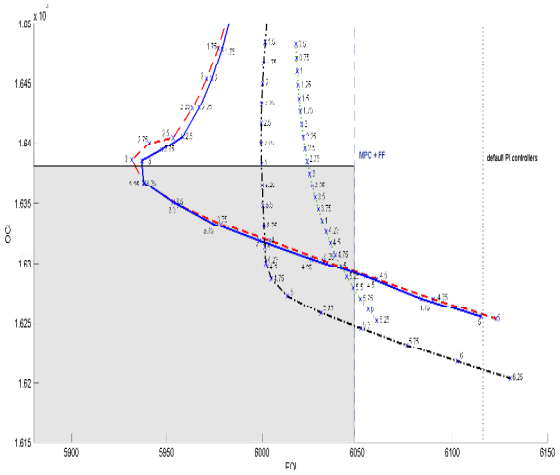


Figura 7: Dry influent: OCI and EQI trade-off with high level MPC for a range of NH5 values (points marked with crosses) and $\Gamma_{\triangle u}$ = 0.001 (dashed line), 0.01 (solid line), 0.05 (dash-doted line) and 0.1 (doted line)

controllers alone are also represented. Fig. 7 shows an area in which results obtained with high level MPC controller improves simultaneously OCI and EQI in comparison with MPC + FF and with default PI controllers alone. This is the proposed tuning region.

The OCI and EQI trade-off representation has also been done for rain and storm influents (Fig. 8 and Fig. 9 respectively), obtaining also the corresponding tuning regions. However they are smaller than one obtained for the dry influent.

Taking into account the OCI and EQI trade-off representations for dry, rain and storm influents (Fig. 7, 8 and Fig. 9 respectively), $\Gamma_{\triangle u}$ and NH5 set points have been selected for the cases of lowest EQI without increasing OCI and the lowest OCI without worsening EQI for every influent in comparison with MPC + FF alone (Table 4).

	dry weather		rain weather		storm weather	
	lowest EQI	lowest OCI	lowest EQI	lowest OCI	lowest EQI	lowest OCI
$\Gamma_{\triangle u}$	0.001	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NH5 set point	3.1	5.4	3.75	4.6	3.7	5

Tabla 4: High level MPC tuning: $\Gamma_{\triangle u}$ and NH5 set point

For these extreme cases, OCI and EQI results are shown in Table 5. For dry influent, in the case of lowest EQI, the final balance from day 7 to day 14 is a reduction of 1.8% of EQI in comparison with MPC + FF alone. As it is observed, for rain and storm influents there is also an improvement by working with high level MPC in comparison with MPC + FF alone, but

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

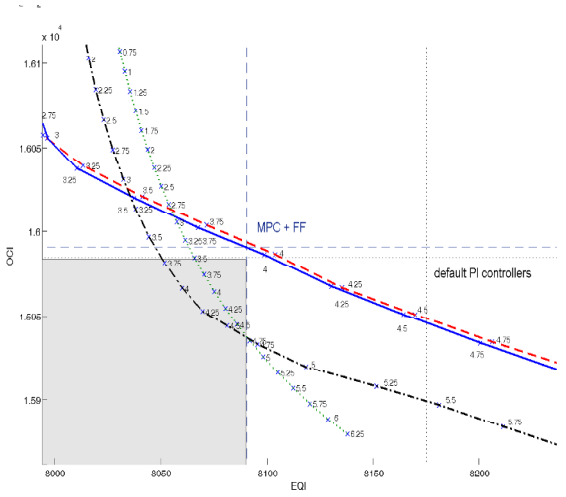


Figura 8: Rain influent: OCI and EQI trade-off with high level MPC for a range of NH5 values (points marked with crosses) and $\Gamma_{\triangle u}$ = 0.001 (dashed line), 0.01 (solid line), 0.05 (dash-doted line) and 0.1 (doted line)

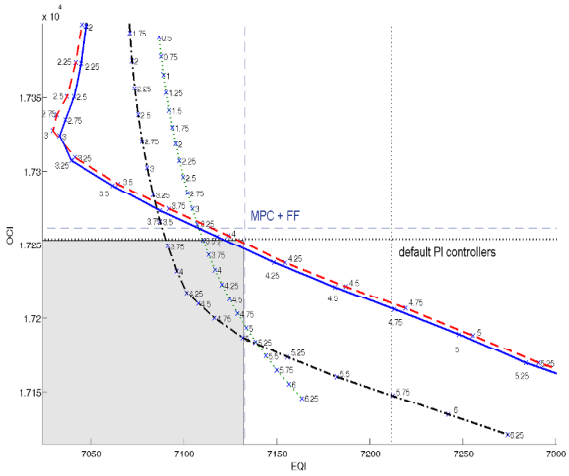


Figura 9: Storm influent: OCI and EQI trade-off with high level MPC for a range of NH5 values (points marked with crosses) and $\Gamma_{\triangle u}$ = 0.001 (dashed line), 0.01 (solid line), 0.05 (dash-doted line) and 0.1 (doted line)

with a lower percentage compared with dry weather. For the rain influent case, EQI is decreased by 0.4% and for the storm influent case, working with high level MPC, EQI is decreased by 0.5%. In the opposite point of the trade-off representations (best OCI without worsening effluent quality), OCI results are also shown in Table 5. For dry influent, an OCI reduction of 0.8% is achieved. For rain influent, high level MPC reduces OCI by 0.3%, and for storm influent the reduction is 0.4%.

Dry weather				
	MPC + FF	High level MPC		
		lowest EQI	lowest OCI	%
EQI (kg pollutans/d)	6048.31	5936.16	6045.44	-1.8%
OCI	16382.97	16382.64	16248.79	-0.8%
Rain weather				
	MPC + FF	High level MPC		
		lowest EQI	lowest OCI	%
EQI (kg pollutans/d)	8090.29	8056.07	8089.98	-0.4%
OCI	15990.85	15982.47	15939.32	-0.3%
Storm weather				
	MPC + FF	High level MPC		
		lowest EQI	lowest OCI	%
EQI (kg pollutans/d)	7132.60	7094.90	7131.57	-0.5%
OCI	17261.39	17252.84	17186.58	-0.4%

Tabla 5: EQI and OCI results with MPC + FF and high level MPC for dry, rain and storm influents

5 Conclusion

In this paper an MPC tuning in a hierarchical control structure for the BSM1 is evaluated with the aim of reducing EQI and OCI.

First, MPC + FF was proposed for the low level to control NO2 and DO5 by manipulating Q_{in} and K_La. The performance control of NO2 and DO5 was improved by more than 90 % for the three weather conditions in comparison with default PI controllers. This performance enhancement resulted in a slight improvement in EQI with similar OCI. MPC + FF was based on [5]. However, in the referred work a feedforward control of NO and DO concentrations in the inlet flow of the first anoxic reactor was implemented, improving the performance of NO2 control, but not of DO5 control in comparison with default PI controllers.

Next, an MPC was also tested for the high level to regulate the DO5 set point of the low level controller according to the NH5. A set of different tuning parameters was determined for the three weather conditions, obtaining a tuning zone where EQI and OCI are reduced with respect to MPC + FF alone. These improvements have been greater in dry weather conditions.

Acknowledgments

This work was partially supported by the the Spanish CICYT program under grant DPI2013-47825-C3-1-R.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

References

[1] J. Alex, J. F. Beteau, J. B. Copp, C. Hellinga, U. Jeppsson, S. Marsili-Libelli, M. N. Pons, H. Spanjers, and H. Vanhooren. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants. In *Conference Proceedings of European Control Conference (ECC'99)*, 1999.

[2] J. B. Copp. Development of standardised influent files for the evaluation of actived sludge control strategies. Iawq scientific and technical report, IAWQ, 1999.

[3] J. B. Copp. *The Cost Simulation benchmark: Description and simulator manual (COST Action 624 and Action 682)*, 2002. Luxembourg: Office for Official Publications od the European Union.

[4] Jean-Pierre Corriou and Marie-Noelle Pons. Model predictive control of wastewater treatment plants: application to the bsm1 benchmark. *Computers and Chemical Engineering*, pages 2849–2856, 2004.

[5] V. Cristea, C. Pop, and P. Serban. Model predictive control of the wastewater treatment plant based on the benchmark simulation model 1 - bsm1. In *Proceedings of the 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering- ESCAPE*, 2008.

[6] M. Henze, C.P.L. Grady, W. Gujer, G.v.R. Marais, and T. Matsuo. Activated sludge model 1. IAWQ Scientific and Technical Report 1, IAWQ, London,UK, 1987.

[7] B. Holenda, E. Domokos, A. Redey, and J. Fazakas. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. *Computers and Chemicals Engineering*, (2008) 32:1270–1278, 2008.

[8] Lennart Ljung. *System Identification - Theory For the User*. PTR Prentice Hall, 1999.

[9] J.M. Maciejowski. *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education, Harlow, England, 1st edition, 2002.

[10] Wenhao Shen, Xiaoquan Chen, and Jean Pierre Corriou. Application of model predictive control to the bsm1 benchmark of wastewater treatment process. *Computers and Chemical Engineering*, pages 2849–2856, 2008.

[11] Wenhao Shen, Xiaoquan Chen, M.N. Pons, and J.P. Corriou. Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation. *Chemical Engineering Journal*, pages 161–174, 2009.

[12] A. Stare, D. Vrecko, N. Hvala, and S. Strmcnick. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs: A simulation study. *Water Research*, 41:2004–2014, 2007.

[13] I. Tackacs, G. Patry, and D. Nolasco. A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Research*, 25:1263–1271, 1991.

[14] H. Vanhooren and K. Nguyen. Development of a simulation protocol for evaluation of resprometry-based control strategies. Technical report, University of Gent, Gent, Belgium, 1996.

[15] D. Vrecko, N. Hvala, A. Stare, O. Burica, M. Strazar, M.Levstek, P.Cerar, and S.Podbevsek. Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers. *Water Science Technology*, 53:125–32, 2006.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL JERÁRQUICO DE PLANTA COMPLETA DE UN CASO DE ESTUDIO DE CRISTALIZACIÓN DE AZÚCAR

Rogelio Mazaeda Echevarría
Departamento de Ing. de Sistemas y Automática, UVA, rogelio@cta.uva.es

Smaranda Podar Cristea
Departamento de Ing. de Sistemas y Automática, UVA, smaranda@autom.uva.es

César de Prada Moraga
Departamento de Ing. de Sistemas y Automática, UVA, prada@autom.uva.es

Resumen

En el presente artículo se describe una estrategia de control óptima de planta completa basada en una descomposición jerárquica de la misma. El caso de estudio considerado se corresponde con un problema realista de la industria azucarera y presenta retos importantes al constituir un sistema híbrido, que mezcla unidades de tipo semi-batch con otras de tipo continuo.

Palabras Clave: control jerárquico, control de planta completa, control distribuido, control predictivo basado en modelo, control del procesos

1 INTRODUCCIÓN

En la presente contribución se describe una estrategia de control jerárquico de planta completa aplicado al control óptimo de un caso de estudio simulado, que aunque muy simplificado, representa un problema realista de la industria azucarera.

El problema a considerar es el de la operación conjunta de las etapas de evaporación y cristalización de una fábrica de azúcar de remolacha típica. El problema es de naturaleza híbrida, en el sentido de que se deben combinar decisiones a realizar sobre unidades que operan de forma continua, con otras relacionadas con la programación de la operación intermitente de los cristalizadores de tipo semi-batch.

El caso de estudio aquí analizado ha sido adoptado oficialmente en el marco de la red de excelencia perteneciente al programa FP7 y denominada **Highly Complex and Networked Control Systems** (HYCON2) y que ha sido descrita en [3] y en [6].

El artículo está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se realiza una descripción somera del caso de estudio, haciendo énfasis en el relato de los principales compromisos a ser sorteados durante su operación, mientras que en la sección 3 se brindan detalles de la solución de tipo jerárquico adoptada. Finalmente, se brindan algunas conclusiones.

2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO DE CRISTALIZACIÓN DE AZÚCAR

En la fig. 1 se muestran los principales elementos del caso de estudio a considerar. El objetivo de la planta, es el de recibir, desde las unidades de proceso aguas arriba no representadas, un jugo o jarabe que contiene sacarosa disuelta en agua, y que es la materia prima que va a ser utilizada en los cristalizadores semi-batch (tachas) para crear los granos de azúcar con la pureza, tamaño y uniformidad que se requieren para su comercialización. El jugo que llega a la sección no sólo transporta el componente útil: la sacarosa, sino que también contiene disueltas otras muchas sustancias, consideradas como impurezas, las cuales juegan un importante rol negativo en el proceso de cristalización. Para caracterizar la presencia de impurezas, se hace uso del concepto de pureza, que es la razón, expresada en por ciento, entre la sacarosa y el total de sustancias disueltas. Otra característica importante a tener en cuente del jugo a procesar, es la concentración total de sustancias disueltas que presente, también expresada en por ciento y que por razones históricas, se denomina como Brix en la terminología azucarera..

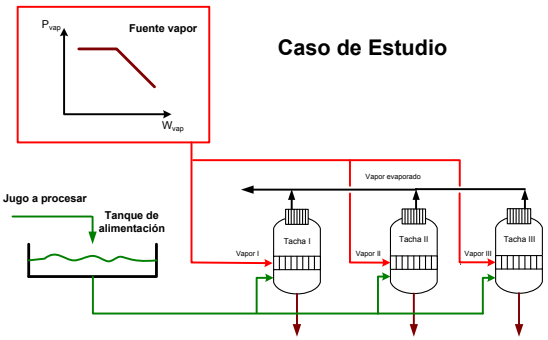


Figura 1: Caso de estudio de cristalización de azúcar

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El proceso de cristalización se realiza en las tres tachas que se encuentran colocadas en paralelo y que, ara el ejemplo, son consideradas como idénticas. El procesamiento se realiza en modo *semi-batch*, siguiendo un receta que pasa por una secuencia de etapas bien definidas. Una descripción detallada del funcionamiento de las tachas aquí tomadas como referencia puede hallarse en [5], [3]. Baste decir, a los efectos de la comprensión del resto del artículo, que el objetivo que se busca es el de hacer crecer, de manera controlada, una población inicial o siembra de cristales de azúcar. Para ello, es fundamental obtener una sobre-saturación de la sacarosa disuelta que sea superior a la unidad pero que no exceda un determinado límite que marca la frontera de la llamada zona ***meta-estable*** y la zona ***lábil***, puesto que de ocurrir lo contrario, habría una explosiva aparición de nuevos cristales, lo cual comprometería severamente la uniformidad del grano resultante.

La sobre-saturación necesaria se logra, en este caso, evaporando el agua en exceso, y para ello hay que suministrar energía que proviene desde una fuente común representada como **Fuente Vapor** en la fig.1. La cristalización controlada que se desea, básicamente consiste en la emigración de las moléculas de sacarosa disueltas hacia la superficie de los cristales existentes. Entonces, para reponer el resultante déficit de sacarosa en la solución, y mantener la sobre-saturación en valores adecuados, se necesita suministrar jugo de alimentación desde el exterior. De manera que para una correcta operación, se debe obtener el adecuado balance entre los ritmos de evaporación de agua y de alimentación de jarabe de alimentación.

Todo el proceso resulta especialmente complicado por el hecho de que la sobre-saturación, que es una variable no directamente medida, depende de la concentración y de la temperatura, pero también de la pureza de jugo y de la composición específica de las impurezas típicas de cada fábrica. En la tacha tomada como referencia para este trabajo, el control de la sobre-saturación se realiza de forma indirecta, controlando en su lugar el Brix o concentración total de la masa cocida, término con el que se conoce a la mezcla de los cristales suspendidos en la solución técnica dentro de la cámara del cristalizador. El control del Brix de la masa se realiza manipulando la válvula de admisión de jugo a la tacha. Pero como la concentración requerida para lograr un determinado valor de sobre-saturación no es constante durante el lote, la solución que se adopta es la de crear una curva de Brix vs nivel, que brinda, para cada punto en la evolución del lote, tomando el nivel que alcanza la masa dentro de la tacha como un indicador de esa evolución, la referencia de Brix a controlar, para que bajo las condiciones de pureza esperada, resulte en una sobre-saturación adecuada dentro de la zona ***meta-estable***.

Debido a las características descritas del proceso de cristalización y a la forma concreta en la que se realiza el control de la tacha, la duración de un lote depende de las características del jarabe de alimentación que se utilice. En la fig. 2a se puede apreciar el efecto de una mayor concentración o Brix del jarabe en el sentido de la reducción del tiempo del lote. El efecto es explicable, puesto que a igualdad de condiciones, a mayor concentración inicial de jarabe, e igual ritmo de evaporación de agua, se arriba de forma más rápida a las concentraciones estipuladas en la curva de Brix vs nivel. Por otra parte, una mayor pureza del jugo entrante, también implica una duración menor. En este caso la explicación tiene que ver con la influencia de la pureza en la sobre-saturación y en la cinética de la cristalización.

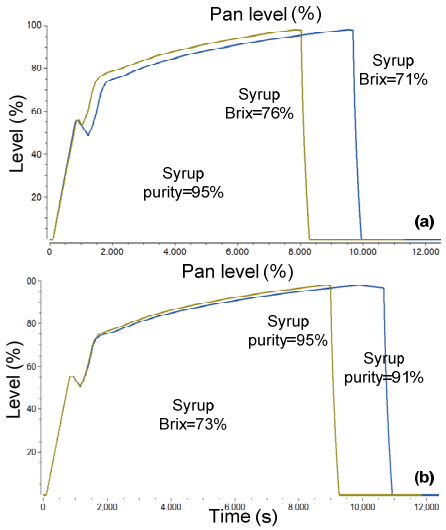


Figura 2: Efecto del Brix y la pureza en la duración del proceso de un lote

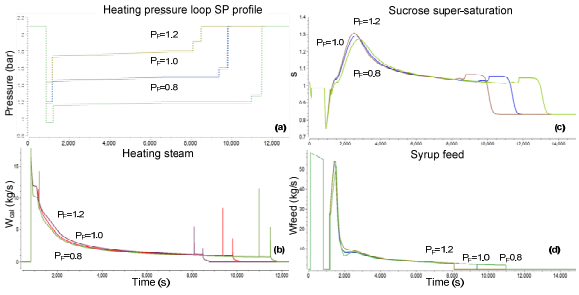


Figura 3: Efecto del perfil de presión de calefacción sobre la duración del lote

Por otra parte, la duración del procesamiento de un lote también puede ser influida por los parámetros de operación del control de la tacha. Por ejemplo, si se aumenta el ritmo de evaporación de agua de la masa cocida, se llegará de forma más rápida al concentraciones especificadas por la curva de Brix y por tanto, se terminará también antes. Para lograr este

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

efecto acelerador-ralentizador, sin modificar demasiado el control original de la tacha, se ha creado un parámetro p_F que multiplica el perfil de referencias para el lazo de control de la presión en el primario del intercambiador de calor de la tacha. De manera que para P_F mayores que la unidad (el valor nominal), todo el perfil de presiones al calefactor se desplazan, paralelas a sí mismas, hacia arriba (fig. 3a), implicando un mayor ritmo de evaporación de agua y por tanto una duración del lote menor. Es importante comprender que esta aceleración del proceso también tiene sus consecuencias. En la fig. 3c se muestra el perfil de sobre-saturaciones para diferentes valores del parámetro p_F. Se puede observar que para valores mayores de la unidad, se tienen valore superiores de la sobre-saturación, corriéndose el riesgo de entrar en la zona lábil para perjuicio de la calidad de los cristales. Esto se explica debido a que la aceleración lograda, aumentado el ritmo de evaporación de agua es, de alguna manera, artificial, puesto que la cinética de la cristalización, que es dependiente de la pureza de la solución, no ha sido modificada. De manera análoga, una disminución muy grande del factor p_F por debajo del valor nominal unitario, puede desembocar en la disolución de los cristales existentes. En las figuras 3.b y 3.d se muestran los perfiles correspondientes al consumo de vapor de calefacción y a la entrada de jarabe de alimentación. La forma específica que tiene el perfil de vapor se debe a que inicialmente el coeficiente de transmisión de calor del calefactor de la tacha es mayor, cuando el nivel de la masa y su viscosidad son menores.

Después de esta necesaria digresión para explicar cualitativamente el funcionamiento de la unidad principal, que es el cristalizador de azúcar, se puede comprender mejor el reto que implica el control de planta completa del caso de estudio representado en la fig. 1. El problema consiste en programar el funcionamiento de cada una de las tres tachas, de forma que se pueda procesar todo el caudal de jugo que llega al departamento. Este problema es equivalente al de mantener el nivel del depósito de alimentación dentro de límites seguros. Nótese que tanto el caudal de jarabe como sus propiedades de pureza y Brix, se pueden considerar como perturbaciones desde el punto de vista de la planta que nos ocupa. El problema de la programación (*scheduling*) de las tachas, depende por supuesto, de la duración del procesamiento de cada lote. Está duración, como se ha señalado previamente, es dependiente de las propiedades antes mencionadas del jugo; pero puede ser influida, dentro de ciertos límites, utilizando los parámetros de aceleración (p_F) de cada tacha. Además de cumplir con la tarea de procesar todo el jarabe entrante, sería conveniente utilizar los grados de libertad que pudieran existir para hacer que el funcionamiento de la planta sea lo más eficiente posible. En el caso concreto planteado, podría intentarse la minimización del consumo total de vapor de calefacción que se envía a todas los tachas a lo largo de todo el ejercicio. Un consumo menor de vapor sería preferible no sólo por el menor gasto energético asociado sino también por el hecho de que al trabajar a ritmos más lentos en cada cristalizador, con cocciones más suaves a sobre-saturaciones más bajas, se obtiene una mejor calidad del producto final. Por otra parte, en una fábrica real, el vapor no consumido por las tachas, puede ser aprovechado por otros consumidores, con el ahorro añadido que eso significa. Debe observarse, que la fuente común de vapor está modelada como una fuente "real", en el sentido de que a partir de cierto umbral de consumo de vapor, la presión empieza a disminuir linealmente con el caudal extraído. De esta manera se ha modelado el hecho de que este recurso compartido, tiene una disponibilidad limitada.

Matemáticamente, el control óptimo de planta completa, quedaría como el siguiente problema de programación no lineal mixta entera (MINLP):

$$\min_{u} J_{\text{total}} = \min_{\mathrm{P_{f\,i}},\,Load_{\mathrm{i}}} \int W_{vap} \tag{1}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} & f_{\text{mod}}(\dot{x}, x, u, p, t) = 0 \\ & L_{\min} \le L_{Buf}(t) \le L_{\max} \\ & s_{\min,\mathrm{i}}(t) \le s_i(t) \le s_{\max,\mathrm{i}}(t) \\ & \mathrm{P}_{f\,\min,i} \le \mathrm{P}_{\mathrm{f}\,i}(t) \le \mathrm{P}_{\mathrm{f}\,\max,i} \\ & Load_i \in \{0,1\} \quad \mathrm{i} \in \{1,2,3\} \end{aligned} \tag{2}$$

En (1) W_{vap} (kg/s) representa el consumo total de vapor instantáneo desde las tres tachas en paralelo y su integral, a lo largo de todo el ejercicio, constituye el índice a minimizar. Las variables de decisión son las señales discretas de arranque de cada una de las tachas ($Load_i$) y los factores de aceleración $P_{Fi.}$ El problema de optimización dinámica debe ser resuelto sujeto a las restricciones representadas por el modelo de toda la planta (f_{mod}), y debe garantizar que el nivel en el tanque (L_{Buf}) se mantenga siempre dentro de límites adecuados. Por otra parte, para garantizar la calidad del producto, se debe garantizar que la sobre-saturación de cada tacha (s) esté entre los límites que marca la zona ***meta-estable***. Para simplificar el problema, se considerará en este caso, que tanto la sobre-saturación como los mencionados límites se encuentra directamente disponibles.

3 ESTRATEGIA DE CONTROL JERÁRQUICO DE PLANTA COMPLETA

El problema de tipo MINLP planteado en (1)-(2) resulta razonable pero se conoce que no escala demasiado bien con el tamaño del problema. Una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

solución de tipo monolítica, tal como la planteada, resulta frágil en el sentido que pequeñas modificaciones en la planta, requerirían de la actualización del modelo central único.

Desde siempre [7], ha existido un interés en la industria, por explorar soluciones óptimas de planta completa no centralizadas, que está además mucho más en sintonía con la manera en la que los proyectos de automatización evolucionan con el tiempo en una fábrica concreta. Este interés, continuamente renovado, existe en particular sobre el uso de estrategias distribuidas o de tipo jerárquico que permitan repartir el esfuerzo de cálculo en varios computadores industriales.

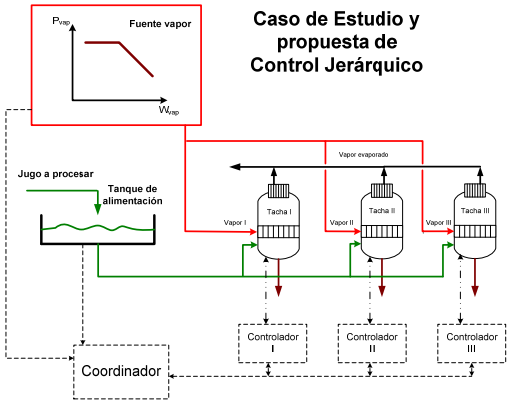


Figura 4. Propuesta de control jerárquico

Para el caso que nos ocupa, un posible enfoque no centralizado sería el que viene descrito en la fig.4 mediante líneas de puntos. Es razonable, por la importancia y la complejidad del equipo, que cada cristalizador individual sea dotado de un control óptimo propio, del tipo MPC, por ejemplo.

Ese tipo de controlador pudiera estar definido como aquel que resuelva el siguiente problema de programación matemática:

$$\begin{aligned}\max_{\mathrm{P_f}} J_{\mathrm{tacha}} &= \max_{\mathrm{P_f}} P_{az} - C_{vap} \\ &= \max_{\mathrm{P_f}} \frac{1}{T_{lote}}\left[\int_0^{T_{lote}} W_{az} - \lambda \int_0^{T_{lote}} W_{vap}\right]\end{aligned} \tag{3}$$

Sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} & f_{\mathrm{tacha}}(\dot{x}, x, u, p, t) = 0 \\ & s_{\min}(t) \le s(t) \le s_{\max}(t) \\ & \mathrm{P_{f\,min}} \le \mathrm{P_f}(t) \le \mathrm{P_{f\,max}} \end{aligned} \tag{4}$$

Se trata en (3) de maximizar una función relacionada con el beneficio económico a obtener de la tacha, utilizando como variable de decisión el factor de aceleración p_F. Obsérvese, en la descripción detallada del índice J_{tacha}, que se intenta maximizar un valor relacionado con el beneficio por unidad de tiempo de funcionamiento de la tacha. El parámetro λ representa, en este caso, la razón entre el coste asignado al vapor de calefacción (W_{vap}) y el precio del azúcar producido (W_{az}). Por supuesto, el problema de programación matemática de tipo NLP planteado, debe cumplir con las restricciones que suponen las ecuaciones dinámicas de la tacha en cuestión. Además de exigir que el valor de la variable de decisión, se encuentre entre límites prefijados, también sería responsabilidad de cada controlador individual que la sobre-saturación permaneciera entre los límites que garanticen el funcionamiento correcto. Nótese, que desde el punto de vista individual de una tacha, pudiera tener sentido terminar con el procesamiento de cada lote lo antes posible, siempre que sea compatible con la asignación relativa de precios brindada por el parámetro λ, puesto que de esa manera, se aumentaría la productividad de la unidad al permitir el lanzamiento inmediato del siguiente ciclo. Pero, evidentemente, desde el punto de vista de la planta en su conjunto, no se gana nada por terminar un lote antes de lo estrictamente necesario, puesto que el objetivo aquí es consumir el caudal de jarabe que está llegando al departamento. Obsérvese que la variable λ en (3) juega el papel de elegir el nivel de compromiso que se prefiere entre la duración de lote y el consumo de vapor necesario para lograrlo. Un valor alto de λ implica un coste proporcional mayor del vapor y por tanto, el MPC privilegiará soluciones que den como resultado un lote de cocción más lenta con menos consumo de vapor.

En vista de la discusión anterior, es evidente, que se requiere de una cierta coordinación entre los controladores individuales para superar la "cortedad de miras" de estas últimas con mayor información sobre el problema global. Esta coordinación puede lograrse mediante intercambio de información, realizada de forma horizontal entre los controladores de igual nivel o utilizando un coordinador (Fig. 4), que colocado a un nivel jerárquico superior, utilizara su punto de vista ventajoso de tener acceso a la estructura general de la planta, a los modelos de los elementos comunes como el depósito de almacenamiento intermedio y la fuente real de vapor y a las lecturas de los sensores que brinden mediciones relacionadas con estas últimas unidades, para, intercambiando información con los controladores individuales, llevar el funcionamiento de la planta en su conjunto hacia un régimen de trabajo parecido al óptimo que se hubiera logrado con lo solución monolítica, centralizada.

$$\min J_{\mathrm{coord}} = \min_{\mathrm{Load}_i, \lambda_i} \int W_{vap} \tag{5}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} & f_{com}(\dot{x}, x, u, p, t) = 0 \\ & L_{\min} \le L_{Buf}(t) \le L_{\max} \\ & Load_i \in \{0,1\} \quad i \in \{1,2,3\} \end{aligned} \tag{6}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

De manera que el coordinador resolvería el problema planteado en (5-6): minimizar el consumo de vapor en todo el ejercicio, de manera que se cumplan con las ecuaciones dinámicas de los modelos de las unidades comunes (el depósito intermedio y la fuente de vapor), asegurando que se mantenga el nivel del depósito en límites preestablecidos. Las variables de decisión, en este caso, sería aquellas que deciden el arranque de las tachas ($Load_i$) pero además se necesitan otras que influyan, de alguna manera, sobre el funcionamiento de los controladores MPC de nivel inferior. Para cumplir esta función, el problema de optimización del coordinador, toma como variable de decisión las mencionadas variables λ de cada problema individual (3-4). En definitiva, del coordinador se espera que logre exigir (mediante los parámetros λ) de los controladores individuales un funcionamiento que sea lo suficientemente rápido como para consumir todo el jarabe que llega al departamento; pero no más, puesto que en caso de terminar antes de lo estrictamente requerido, estaríamos derrochando caudal de vapor sin aportar ninguna ganancia.

El coordinador deberá hacer además lo necesario para coordinar el acceso a los recursos comunes, en este caso el jarabe en el depósito intermedio y el vapor de calefacción. Para esto último dispone de las variables que permiten programar el arranque de cada tacha.

Con lo que se ha discutido hasta el momento, el coordinador carece de recursos suficientes para realizar la tarea descrita de forma cualitativa en los párrafos previos. Claramente, los modelos de las unidades comunes son necesarios pero no brindan toda la información que se requiere para ligar, por ejemplo, los parámetros λ, con el consumo de vapor. Una alternativa sería utilizar el modelo de la planta completa a nivel del coordinador, pero en este caso no estaríamos ganando mucho con respecto a una solución centralizada. Otra posibilidad sería la de utilizar un mecanismo de coordinación de precios, tal y como viene descrito en [4]. Este tipo de soluciones brindan soluciones coordinadas que se puede probar coinciden con el óptimo del problema global y permiten resolver de forma estricta el problema de la disponibilidad limitada de los recursos compartidos. Sin embargo, esto algoritmos típicamente requieren la realización de iteraciones hasta llegar consensuar el precio adecuado de los recursos comunes por los que compiten los controladores individuales. En el caso que nos ocupa, que es de tipo esencialmente dinámico, estas iteraciones de consenso deberían realizarse a todo lo largo del horizonte de predicción, que para el caso del control de unidades *batch*, suelen incluir toda la duración del ciclo. Por esta razón, aunque esta es una opción digna de explorar en futuras contribuciones, aquí se ha optado por una alternativa más simple.

Si se fuera capaz de establecer un modelo sencillo entre las variables λ y el consumo de vapor que se corresponde con la misma, entonces el coordinador estaría en condiciones de proponer valores para dicha variable de decisión que minimizara dicho consumo, que es el índice de prestaciones a minimizar en el problema (5-6). Una manera de hacer esto es definir un intercambio de información entre los controladores subordinados y el controlador que incluya la mejor predicción, que con los datos actuales, cada controlador tenga del perfil de consumo de vapor en todo el proceso de la tacha. Y que además brinde la sensibilidad de dicho perfil ante variaciones del parámetro λ en torno al valor actual del mismo. Con esta información el coordinador podría conformar el modelo lineal que buscaba, que sería válido en un entorno reducido del punto de operación en que se estuviera, pero que sería suficiente para brindar la ligadura entre variable de decisión y función objetivo que se requiere.

$$W_{vap_i}(k+1) = W_{vap_i}(k) + \frac{\partial W_{vap_i}(k)}{\partial \lambda_i(k)}\left[\lambda_i(k+1) - \lambda_i(k)\right] \quad (7)$$

Nótese que los vectores W_{vap_i} y el gradiente respecto a λ son vectores de iguales dimensiones, cuyo tamaño depende de la duración del lote y del grado de precisión con el que se desee trabajar.

Esta estrategia puede ser extendida directamente para permitir al controlador la realización del programación (*scheduling*) del funcionamiento discontinuo de las tachas. El coordinador conoce el modelo sencillo del depósito intermedio cuyo nivel debe mantener. Conoce además, a partir del informe de los sensores, el caudal actual del jarabe que arriba al departamento y también sus propiedades de Brix y pureza, pero evidentemente, le falta información sobre el perfil futuro de los consumos de jarabe desde cada tacha. Pero esta información puede ser suplida por cada una de los controladores individuales de las tachas, de la misma forma que se hace con el perfil de vapor. Esto es, cada vez que el coordinador lo solicite, el controlador de cada tacha enviará, mediante un vector de dimensiones acordadas, la mejor predicción, que con la información actual que el posee, pueda hacer del perfil de consumo de jarabe y de su sensibilidad respecto al parámetro λ. Con esta información se puede, por una parte, modelar linealmente la dependencia del perfil de consumo de jugo respecto a λ con una ecuación como (8).

$$W_{jar_i}(k+1) = W_{jar_i}(k) + \frac{\partial W_{jar_i}(k)}{\partial \lambda_i(k)}\left[\lambda_i(k+1) - \lambda_i(k)\right] \quad (8)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Pero, adicionalmente, con la información del perfil de consumo de jarabe de cada tacha, el coordinador puede proponer diferentes desplazamientos entre los perfiles recibidos, para buscar el cumplir con la restricción de que el nivel del depósito intermedio se mantenga dentro de los límites previstos. Esta estrategia tiene la virtud adicional, de que por efectos de la parametrización elegida, se sustituyen las variables enteras originales ($Load_i$), por variables continuas que representan el mencionado desplazamiento entre los diferentes ciclos de la misma tacha (Δt_i).

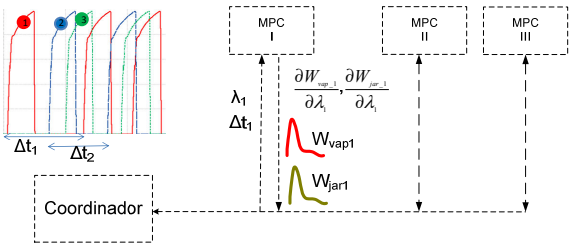


Figura 5. Intercambio entre coordinador y controladores locales

De manera que, en resumen (ver fig. 5), los controladores locales han sido implementados como controladores de tipo MPC utilizando las variables p_F de cada tacha para resolver el problema formulado en (3-4). El horizonte de control de estos MPC locales se cuentan en ciclos completos de los cristalizadores *batch* que controlan. El índice de coste a optimizar se realiza con el parámetro λ específico recibido desde el coordinador. Por otra parte, el coordinador y los controladores locales intercambian información: el primero recibe vectores con los perfiles de consumo de jarabe y vapor de calefacción y con sus respectivos gradientes con respecto a λ. Mientras que los controladores locales reciben el valor de λ a aplicar en su control local y el instante de tiempo en que debe arrancar la tacha. El coordinador, a su vez, resuelve el problema (5-6) utilizando igualmente el esquema de horizonte deslizante típico de los controladores MPC. Utiliza además los modelos lineales simples, representados por las ecuaciones (7-8) que construye sobre la marcha con la información que recibe de los controladores locales. Existen problemas técnicos a resolver con este esquema, el más importante de los cuales es el de cómo los MPCs determinan los gradientes respecto a λ que el esquema propuesto requiere. En la implementación actual se ha tomado la solución provisional de resolver el problema local dos veces, dando un incremento pequeño al λ actual. Esta solución es factible en este caso por la relativa sencillez de los problemas locales. En futuras implementaciones, una posible línea de acción será la de calcular los gradientes a partir de la información que se obtenga de anteriores iteraciones, siguiendo un esquema de tipo de control dual.

En las figuras de la 6 a la 8 se muestran resultados de simulación obtenidos para un ejercicio correspondiente a un día de trabajo. Se han elegido los tiempos de muestreo de los MPC locales y del coordinador, como idénticos e iguales a media hora. El horizonte de predicción de los MPC locales ha sido tomado igual a un ciclo entero de la tacha controlada; mientras que el correspondiente al MPC del coordinador ha sido, igualmente, elegido igual a un ciclo completo de las tres tachas que supervisa.

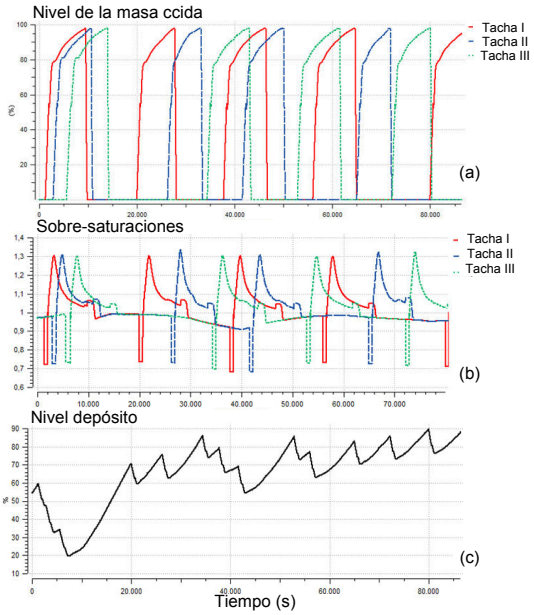


Figura 6. Resultados de programación de la tachas. (a) evolución de los niveles (b) sobre-saturaciones (c) evolución del nivel en el depósito.

En la figura 6. Se muestran los ciclos de la programación resultante, tal y como son evidenciados por la evolución del nivel en cada una de las tres tachas. En fig. 6.b se tiene la evolución de las correspondiente sobre-saturaciones, siempre dentro de los límites de la zona meta-estable y finalmente en fig. 6c se observa el nivel del depósito intermedio, que se logra conservar entre los límites especificados. En la figura 7.a se tiene la evolución de los Δt_i correspondientes al arranque de las tachas que resultan de la programación realizada por el controlador. En fig. 7.b, por su parte, se muestran los factores pFi que han sido propuestos, en cada momento, por los MPC locales, al resolver el problema óptimos que resultan de utilizar los parámetros λ concretos que el coordinador estableció. La solución de planta completa que los controladores distribuidos de forma jerárquica han propuesto, se ha realizado en presencia de importantes perturbaciones tanto en el caudal de jarabe que llega al departamento (fig. 8.a) como en su Brix (fig. 8.b) y su pureza (fig. 8.c).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

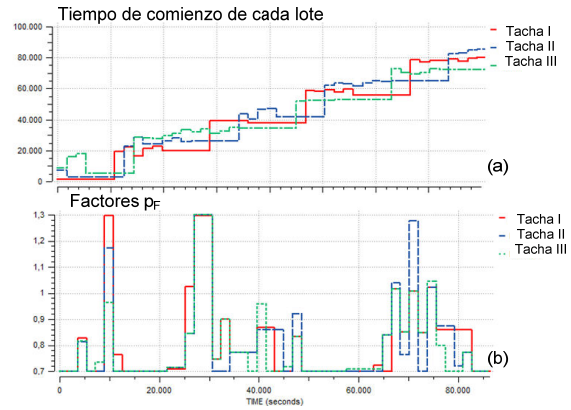


Figura 7. (a) Variable de decisión correspondiente al tiempo de arranque de cada tacha (b) factor de aceleración de cada tacha.

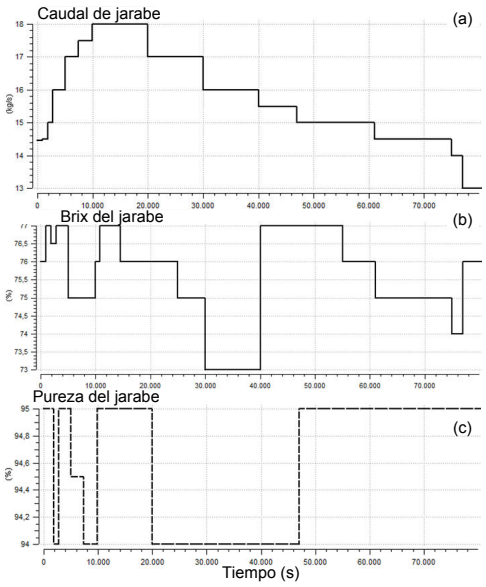


Figura 8. Perturbaciones relacionadas con el jarabe de entrada

En todos los casos, los problemas de programación matemática de tipo NLP resultantes han sido resueltos mediante el algoritmo de tipo SQP SNOPT. A pesar de que la solución del problema de los gradientes de los consumos de los recursos compartidos ha sido realizada mediante incrementos finitos, resolviendo dos veces, en cada periodo de muestreo, los problemas locales de optimización, la velocidad de cómputo de la estrategia distribuida de control propuesta es bastante buena, ocupando en promedio sólo la mitad del tiempo de muestreo al resolverla en un ordenador convencional. Los modelos y las simulaciones numéricas han sido desarrolladas en el lenguaje EcosimPro [2].

4 RESUMEN

En el presente artículo se ha descrito una estrategia de control óptima, jerárquico, aplicado a una planta completa que representa un problema realista de la industria azucarera. La planta estudiada representa un reto particularmente exigente para realizar la descomposición jerárquica, puesto que el problema del *scheduling*, típicamente tratado en los niveles jerárquicos superiores, está en este caso muy imbricado con las decisiones que se toman en la etapas inferiores, ver por ejemplo [1] para una discusión de estos temas. Pero, por otra parte, el ejemplo estudiado pertenece una clase amplia de problemas en los que se tienen un conjunto de unidades que utilizan y deben competir por recursos comunes compartidos, de manera que las soluciones halladas pueden ser fácilmente generalizables.

Se ha diseñado una solución mediante la cual se exige del coordinador un nivel de conocimiento mínimo de las unidades de nivel inferior a controlar. El coordinador crea a partir de información brindada por las unidades subordinadas, relativa a los perfiles de consumo de los recursos compartidos así como de las sensibilidades de esos perfiles con respecto a las variables de decisión del coordinador, modelos lineales simples que le permiten buscar la solución óptima del problema de planta completa, coordinando de manera efectiva el trabajo de las unidades subordinadas.

Agradecimientos

El presente artículo ha sido desarrollado en el marco de la red de excelencia europea FP7: HYCON 2. Adicionalmente, este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT DPI2012-37859..

Referencias

[1] S. Engell, I. Harjunkoski, 2012, Optimal operation: Scheduling, advanced control and their integration, *Computers and Chemical Engineering*, 47, 121-133.

[2] ESA International, 2011. EcosimPro User Manual, EL Modelling Guide. EA International.

[3] HYCON2/WP5 sugar show case [Online], 2013, Available: hycon.isa.cie.uva.es/home, last accessed: January 23, 2014 .

[4] R. Martí, D. Navia, D. Sarabia, C. de Prada, 2012, Shared Resources Management by Price Coordination, *Computer Aided Chemical Engineering*, 30, 902-906.

[5] R. Mazaeda, A. Merino, C. de Prada, and L.F. Acebes, 2011, Sugar End Training Simulator, *International Sugar Journal*, 114, 42-49.

[6] R. Mazaeda, L.F. Acebes, A. Rodríguez, S. Engell, C. de Prada, 2014, Sugar Crystallization Benchmark, *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, 613-618.

[7] P. Tatjewski, 2008, Advanced Control an on-line process optimization in multi-layer structures, *Annual Reviews in Control*, 32, 71-85.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Analysis of controller performance in wastewater treatment

J. C. Malca
Dept. Telocomunicació i Enginyeria de Sistemes, ETSE, Universiat Autònoma de Barcelona,
JeanCarlos.Malca@uab.cat

R. Vilanova
Dept. Telocomunicació i Enginyeria de Sistemes, ETSE, Universiat Autònoma de Barcelona,
Ramon.Vilanova@uab.cat

Abstract

The present work studies the controller selection considering both the local control loop point of view and , but also a global process approach. This work was carried out in a wastewater treatment plant, focusing on the of dissolved oxygen control loop. The control loop was approached by means of two control strategies. The multi-objective genetic algorithm ϵv-MOGA was used to analyzed the trade-off involved on both approaches. The findings show that a optimal controller solutions obtained maintain their optimality regardless of the framework in which they are evaluated (local vs globlal), therefore showing that tuning on the basis of control loop indicators is also valid for the global plant perspective.

Keywords: Wastewater treatment plant; Multi-objective optimization; Genetic algorithms .

1 Introduction

The wastewater treatment is a large complex process involving a mechanical physical, biological and chemical process. Due to its environmental impact and the continued tightening of pollution control policies, improving plant performance is getting more relevant. Instrumentation, control and automation may increase the capacity of biological nutrient removal of wastewater treatment plants by 10-30% [9]. In the literature, several variables were studied as manipulated variables: Dissolved Oxygen (DO) concentration, internal recycle flowrate, sludge recycle flowrate and external carbon dosing rate. This work focuses in the dissolved oxygen control, since it is the most wide-spread strategy in real-scale plants and one of the more deterimnant control loop in wastewater treatment plant [10].

In the process of tuning a controller for a feedback loop is most commonly spread to focus only on the requirements of the control loop in which it is located and ignoring other posible loop also present. But in such a complex process where various existing dynamics interact with each other, the controller can be tuned only focusing on accomplishing the control loop criteria or on the overall process performance criteria. Both points of view will result in identical , or similar, tunings if the loop is highly determinant of the overall process performance.

Each one of these approaches is associated with conflicting objectives wich should be optimized simultaneously. To solve each of these, a different multi-objective optimization problem is stated. Unlike single-objective techniques that join all competiting objectives into one, to generate a unique optimal solution, multi-objective techniques provide a set of optimal solutions, known as Pareto set. The representation of the Pareto set in the objective function space is called the Pareto front. Each point of the Pareto front represents a different trade-off between the conflicting objectives, in which any improvement in one objective result in the degradation of one or more of the other objectives. This way the decision maker can select the best final solution according to its preferences.

The use of evolutionary algorithms (EAs) to solve complex multi-objective probems have been motivated mainly because of the population-based nature of EAs wich allows the generation of several elements of the optimal Pareto set in a sigle run [2]. In literature , it can be found different multi-objective evolutionary algorithms (MOEAs)[2]: MOGA , NPGA, NSGA, PAES, NSGAII, SPEA. In this work, the ϵ-multi-objective genetic algorithm variable (ϵv-MOGA) [8] has been selected. It is a new MOEA based on the concept of ϵ - dominance, having the following main features: capability to characterize all kind of Pareto fronts (non convex, discontinous, etc), adapting the extremes of the Pareto front with independence of the parameters, the memory requirements are always bounded, obtaining a reduced but well distributed representation of the Pareto front.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

On the basis of the previous premises, in this work, the cost/performance trade-off is analyzed both of local and global levels. The analysis will relate the corresponding Pareto front in order to see if the controller selection may leed to different trade-off solution depending on the adopted point of view. Therefore what will be compared will not be single tunings but tradeoff spaces represented by the corresponding Pareto fronts.

The paper is organized as follows: Section 2 introduces the wastewater treatment process model, DO control strategies and local and global approaches. Section 3 focuses on the multi-objective problem for each one of approaches: the optimization problem formulation and the description of multi-objective algorithm ϵv-MOGA. Simulation results are presented in Section 4 where the comparison of the two approaches based on obtained Pareto fronts is conducted. Finally, concluding remarks are given in Section 5.

2 Materials and Methods

2.1 Plant layout and process model

The Benchmark Simulation Model No.1 (BSM1) was selected to represent the wastewater treatment process. It is the result of cooperation of the working group of the IWA, the COST Action 682 and COST 624 Action. The BSM1 is a simulation environment that defines a schema of the treatment plant, a simulation model, influent types, a test procedure and an evaluation criteria [3].

The plant layout consists of a serie of five activated sludge bioreactors, divided into two sections: an anoxic section comprised of the first two non-aerated mixed reactors and an aerobic section, consisting of the last three aerated reactors. The BSM1 combines pre-denitrification and nitrification, which is the most common configuration for biological nutrient removal for full-scale wastewater treatment plant. The series of reactors is followed by a non-reactive secondary clarifier, that allows the separation of water from sludge. There are both internal and external recirculation flows. Internal nitrate recirculation is performed from the last reactor to the first input. While external recirculation of sludge is made from the secondary clarifier to the process input. A graphic description can be found in figure 1. The Activated Sludge Model N^o 1 (ASM1) [4] was selected to describe the biological reactions in both anoxic and aerobic reactors and the double-exponential settling velocity model [11] was chossen to simulate the secondary settler.

BSM1 was designed to treat an average influent flow of 18,446 $m^3.d^{-1}$ with an average COD concentration of 300 gm^{-3}. The volume of each one of the anoxic reactors is $1000m^3$ and that of the aerobic reactors is $1333m^3$. The volume of the secondary clarifier is 6,000 m^3.

Three dynamic input data profiles have been developed to allow uniform testing and evaluation. Each one represents different weather conditions (dry, rain and storm events) with realistic variations of the influent flow rate and composition.

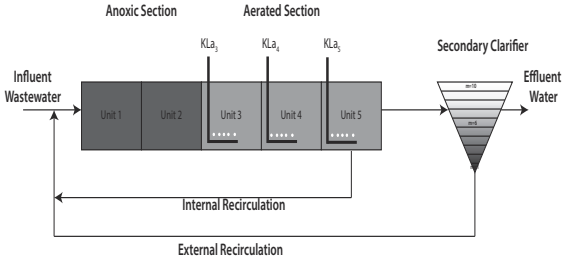


Figure 1: Schematic representation of the BSM1 from [3].

2.2 Control of the dissolved oxygen concentration

This work focuses on dissolved oxygen concentration control because it is the most widespread control strategy in full-scale wastewater treatment plant. Two different configurations of dissolved oxygen control based on PI controller are analyzed. Both strategies are shown in figure 2. The first startegy (S1) is based on the dissolved oxygen control loop propossed on BSM1. That is controlling the dissolved oxygen at process output by means of the oxygen mass transfer coefficient of the last aerobic reactor (K_La_5). The K_La of the other reactors are set to $240h^{-1}$. On the other hand, in the second configuration (S2), the dissolved oxygen at process output is controlled by manipulating the three aerobic reactors ($K_La_{3,4,5}$). For both configurations, the internal recirculation was set to 55,338 $m^3.d^{-1}$, and the influent profile consist of repeating the first day of the dry influent over 14 days to avoid disturbances on the relationships to be studied. A summary of the strategies are shown in Table 1.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

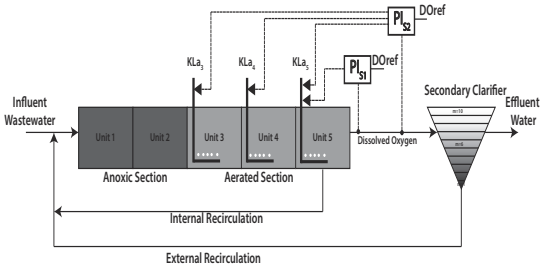


Figure 2: Description of control strategies: Strategy-1 controller (PI_{S1}) and Strategy-2 controller (PI_{S2})

	Strategy 1 (S1)	Strategy 2 (S2)
Controlled variable	DO concentration	DO concentration
Manipulated variable	$kLa5$	$kLa3, kLa4, kLa5$
Qintr	$55,338m^3.d^{-1}$	$55,338m^3.d^{-1}$
kLa	$kLa3 = kLa4 = 240h^{-1}$	not fixed

Table 1: Dissolved oxygen control strategies.

2.3 Approaches

Since the wastewater treatment is a large complex process, the controller performance can be analyzed from different points of view. In this work, the selection of controller parameters was carried out on two frameworks: Local and global perspective.

2.3.1 Local Approach (LA)

This approach is focused on the control loop. So that, decisions are taken based on control loop criteria. This can be considered as the control experts' point of view.
From this perspective, there are two aspects to be taken into account regarding controller performance. One of them is the control quality by means of deviation of measuring controlled output from the setpoint. In this work, the Integral Absolute Error (IAE) criterion was selected to represent it (1).

$$IAE = \int |\varepsilon| \cdot dt \tag{1}$$

Where ε is the error between the the setpoint and the controlled response.

Another important factor is the energy comsuption associated to the control action. Since the variable manipulated is the oxygen mass transfer coefficient, the energy consumption is mainly caused by the aeration comsuption. And it is computed acording the formula described on BSM1 (2).

$$AE = \frac{S_O^{sat}}{t_{obs}.1.8.1000} \int_{t=7days}^{t=14days} \sum_{k=1}^{5} V_{as,k} K_L a_k\,(t) \cdot dt \tag{2}$$

Where S_O^{sat} is the oxygen saturation level, $V_{as,k}$ and $K_L a_k$ are the volumen and the oxygen transfer coefficient of the reactor k, respectively.

2.3.2 Global Approach (GA)

From this perspective, all processes involved along the watewater treatment are considered as a unique unit. So that, decisions are taken based on the plant operation criteria. This can be considered as the treatment process experts' point of view.

In this approach, the controller performance can be evaluated by means of indicators describing the overall performance of the wastewater treatment plant as a whole. For this purpose, Effluent Quality Index (EQI) and Overall Cost Index (OCI) as they are described on BSM1 are used. EQI indicates the quality of the effluent water). OCI represents the cost associated on the. They are stated by (3) and (4) respectively.

$$EQI = \frac{1}{t_{obs}.1000} \int_{t=7days}^{t=14days} \begin{pmatrix} B_{TSS}.TSS_e(t) + B_{COD}.COD_e(t) \\ +B_{NK_j}.S_{NK_{j,e}}(t) + B_{NO}.S_{NO,e}(t) \\ +B_{BOD5}.BOD_e(t) \end{pmatrix} Q_e(t) \cdot dt \tag{3}$$

Where $Q_e(t)$ is the effluent flow rate ; $TSS_e(t)$, the total amount of solids present in the effluent; $COD_e(t)$, the chemical oxygen demand; $S_{NK_{j,e}}(t)$, $S_{NO,e}$, Nitrate and nitrite nitrogen concentration and BOD_e, biochemical oxygen demand . B_i are weigthing factor for different types of pollution to cnonvert them into polllution units.respectively.

$$OCI = AE + PE + 5.SP + 3.EC + ME \tag{4}$$

Where AE is the areation energy ; PE, the pumping energy; SP, sludge production, EC refers to energy comsumption due to external carbon and ME , the mixing energy.

3 Multi-objective Problem

On the basis of the previous section, in each approach, a different multi-objective problem is

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

stated to analyze the trade-of between its conflicting objectives. On the following subsections, the the multi-objective problem formulation and the optimization algorithm selected to solve it are presented.

3.1 Optimization algorithm

The ϵ-multi-objective genetic algorithm variable (ϵv-MOGA) has been designed to achieve a reduced but well distributed representation of the Pareto front [8]. The algorithm adjusts the limits of the Pareto front dynamically and prevents the solutions belonging to the ends of the front from being lost[6].

Let a multi-objective problem be stated as follows:

$$\min_{\theta \in D \in R^L} \mathbf{J}(\theta) = \min_{\theta \in D \in R^L} [J_1(\theta), J_2(\theta), \ldots, J_S(\theta)] \tag{5}$$

where $J_i(\theta)$, $i \in B := [1 \ldots s]$, are the objectives to optimize and θ is a solution inside the L-dimensional solution space D. The objective space is split up into a fixed number of boxes. For each dimension $i \in [1 \ldots s]$, n_box_i cells of ϵ_i width are created where

$$\epsilon_i = (J_i^{max} - J_i^{min})/n_box_i,$$

Where J_i^{max} and J_i^{min} are the maximun and minimun value of J for each dimension i, respectevily.

This grid preserves the diversity of $J(\Theta_P^*)$ since one box can be occupied by only one solutiom. This fact prevents that the algorithm converges towards just one point or area inside the objective spaces (figure 3). The concept of ϵ-dominance is defined as follows: for a solution $\theta \in D, box_i(\theta)$ is defined by

$$box_i(\theta) = \left[\frac{J_i(\theta) - J_i^{min}}{J_i^{max} - J_i^{min}} . n_box_i \right] \tag{6}$$

Let $box(\theta) = \{box_1(\theta), ..., box_s(\theta)\}$. A solution θ^1 with value $J(\theta^1)$ ϵ-dominates the solution θ^2 with value $J(\theta^2)$, denoted by $\theta^1 \prec_\epsilon \theta^2$, iff

$$box(\theta_1) \prec box(\theta_2 \vee (box(\theta_1) = box(\theta_2) \wedge \theta^1 \prec \theta^2)$$

Hence, a set $\Theta_P^* \subseteq \Theta_P$ is ϵ-Pareto if and only if $\forall \theta_1, \theta_2 \in \Theta_P^*, \theta_1 \neq \theta_2$,

$$box(\theta_1) \neq box(\theta_2) \wedge box(\theta_1) \not\prec_\epsilon box(\theta_2) \tag{7}$$

This algorithm is composed of three population:

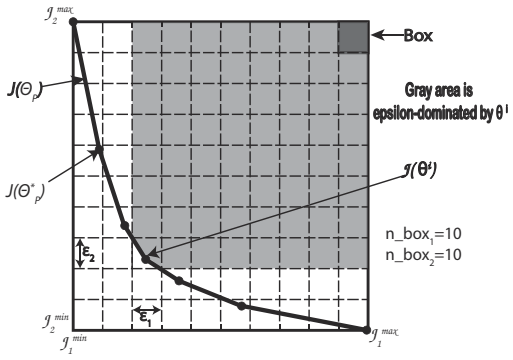


Figure 3: The concept of ϵ-dominance. ϵ-Pareto Front $J(\Theta^*)_P$ in a two-dimensonal problem. J_1^{min},J_2^{min} , J_1^{max} , J_2^{max}, Pareto front limits; ϵ_1, ϵ_2 box widths; and n_box_i, n_box_i , numbers od boxes for each dimension.

1. Main Population $P(t)$ explores the searching space D during the algorithm iterations (t). Population size is $Nind_P$.
2. Archive $A(t)$ stores the solution Θ_P^*. Its size $Nind_A$ can be variavle and will never be higher than.

$$Nin_max_A = \frac{\prod_{i=1}^{s} n_box_i + 1}{n_box_i + 1} \tag{8}$$

   where $n_box_{max} = max([n_box_1, \ldots, n_box_s])$.
3. Auxilary population $G(t)$. Its size is $Nind_G$, which must be an even number.

The pseudocode of the ϵv-MOGA algorithm is given by:

```
1. t:=0
2. A(t):=∅
3. P(t):=ini_random(D)
4. eval(P(t))
5. A(t):=store_ini(P(t),A(t))
6. while t<tmax do
7.     G(t):=create(P(t),A(t))
8.     eval(G(t))
9.     A(t+1):=store(G(t),A(t))
10.    P(t+1):=update(G(t),P(t))
11.    t:=t+1
12. End while
```

A comprehensive description of the algorithm can be found in [5].

3.2 Decision Varibales

Since the choice of controller parameters are determinant in the PI-controller performance, the controller gain (K_p) and the controller integral time

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

contant (T_i) are selected as decision variables. The default case represents the default parameter values for the dissolved oxygen PI controller proposed by BSM1. The default case is a reference for comparison with further developments. In table 2 can be found a summary of the desicion variables and the default case.

Variable	Default case	Optimization range	
		Min	Max
Controller gain K_p	25.00	0	100.00
Controller integral time constant T_i	0.002	0.0001	10.00

Table 2: Decision Variables for optimization problem

3.3 Optimization problem formulation

In order to analyze the controller performance for each approach, two different optimization problems with a different objective set are stated.

3.3.1 Optimization problem: LA

From this perspective, there are two conflicting objective functions IAE and AE, (1) and (2) respectively. Let Set1 $= \{IAE, AE\}$. The main objective in this perspective is to achieve the greatest possible reduction of Set 1, i.e., to obtain the minimum value of both IE and AE simultaneously. However, this scenario is an ideal situation. To analyze the trade-off between them, it is set a multiobjective problem (MOP1) which aim is to minimize the integral absolute error and to minimize the energy comsuption subject to the model equation described on BSM1. MOP1 is stated by (9). The decision variables are bounded according to table 2.

$$\begin{aligned} \text{MOP1}: \quad & \underset{K_p, T_i}{\text{Minimize}} \quad \mathbf{J} = \text{Set1} \\ & \textit{subject to:} \\ & \qquad \text{BSM1 model equations} \\ & \textit{Bound on the decision variables:} \\ & \qquad 0 \leq K_p \leq 100, \\ & \qquad 0 \leq T_i \leq 10, \end{aligned} \tag{9}$$

3.3.2 Optimization problem: GA

From this perspective, there are two conflicting objective functions EQI and OCI, (3) and (4). Let Set2 $= \{OCI, EQI\}$. Like in the previous perspective, to achieve the greatest possible reduction of both OCI and EQI is an ideal situation. A multiobjective function optimization (MOP2) is formulated where the aim is to minimize the effluent quality and to minimize the operational cost, subject to the model equation described on BSM1. MOP2 is stated by (10). The decision variables are bounded according to table 2.

Objective set	Objective functions
Set 1	IAE
Local Approach	Aeration Energy
Set 2	EQI
General Approach	OCI

Table 3: Description of objective sets

$$\begin{aligned} \text{MOP2}: \quad & \underset{K_p, T_i}{\text{Minimize}} \quad \mathbf{J} = \text{Set2} \\ & \textit{subject to:} \\ & \qquad \text{BSM1 model equations} \\ & \textit{Bound on the decision variables:} \\ & \qquad 0 \leq K_p \leq 100, \\ & \qquad 0 \leq T_i \leq 10, \end{aligned} \tag{10}$$

A summary of the optimization problems can be found in Table 3.

3.4 Algorithm parameters

Due to the computational cost involved in the simulation of BSM1 model, a balance between computational demand and the ϵv-MOGA performance should be achieved. The algorithm parameters were selected to maintain this balance. The number of generations was set to 600 with an initial population size of 45. A mutation probability of 0.1 and a crosover probability of 0.25 are selected.

4 Simulation Results and discussion

The εv-MOGA algorithm is applied to the proposed multi-objective problems proposed at both local and global. The plant simulation was carried out folllowing the procedure described by the BSM1, i.e. a 100-day period of stabilization under a constant influent was completed before using the dry weather profile during 14 days followed by the weatherfile to be tested. The influent profile consist of repeating the first day of the dry weather file over 14 days. For both configurations, the internal recirculation was set to $55,338 m^3.d^{-1}$. For all expereriments, the range of the decision variables (parameters K_p and T_i) was according to Table 2. The experiments were divided into 2 parts. The first step consisted in choosing a controller tuning for strategy S1 considering both perspectives. In the second one, these experiments were extended to the second strategy (S2).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.1 Analyzing strategy 1

Both multi-objective problems (MOP1 and MOP2) were analyzed separately considering the strategy 1. The disolved oxygen set-point (DOref) was fixed to $2mg/l$ which is the DO default set-point in BSM1. The results obtained from MOP1 and MOP2 are shown in figures 4 and 5, respectively. For both aproaches, the default tuning belongs to the pareto solution. The default tuning is in the lower right of the Pareto front end, rewarding quality rather than associated cost. From this it can be seen that there is a region where cost is reduced without losing optimality in the Pareto sense.

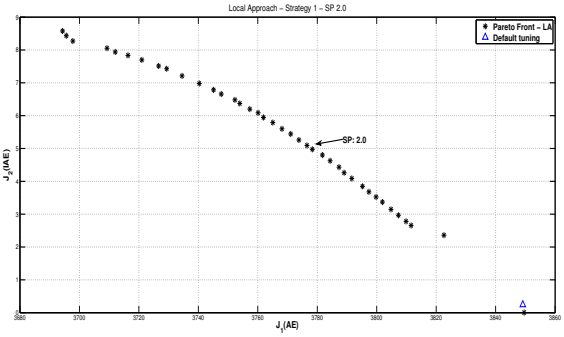


Figure 4: Pareto Front from Local Approach- Strategy 1

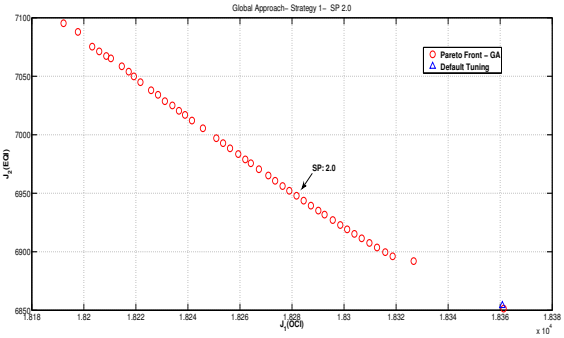


Figure 5: Pareto Front from Global Approach - Strategy 1

Moreover, the family of optimal controllers obtained from the local approach (MOP1) is represented on the global approach. This representation corresponds to the pareto front obtained from the global approach (MOP2). It is noted that if the values of IAE and AE of an optimal solution decrease in the local approach, in the global approach the values of OCI and EQI also do respectively. This situation also occurs in reverse, as shown on figure 6. This fact indicates that choosing a tuning from a approach is reflected in the other one without losing optimality.

Controller selection. The Nash bargaining solution [1] was used for selecting a tuning from the Pareto front on both approach. N_{LA_1} and N_{GA_1} are the tunings chosen from the local and global approach respectively. While $N^*_{LA_1}$ is the representation of N_{LA_1} in the global approach and $N^*_{GA_1}$ is the representation of N_{GA_1} in the local approach. As shown in figure 7, $N^*_{GA_1}$ presents an increment of 0.56 % of AE but a reduction of 32 % of IAE respect to $N^*_{LA_1}$. While $N^*_{LA_1}$ presents a reduction of 0.12 % of OCI level but an increment of 0.5 % of EQI level respect to N_{GA_1}.

4.2 Analyzing strategy 2

As with Strategy 1, both MOP1 and MOP2 were analyzed, fixing the dissolved oxygen set-point at $2mg/l$. The pareto front obtained from MOP1 and MOP2 are shown in figures 8 and 9, respectively. The results are similar to those obtained on the strategy 1. Although having not been designed for this strategy, the default tune belongs to the pareto front in both approaches. It is in the lower right corner of the Pareto front end, rewarding quality rather than cost associated.

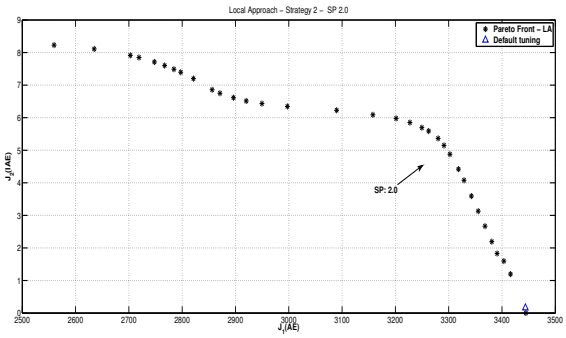


Figure 8: Pareto Front on Local Approach- Strategy 2

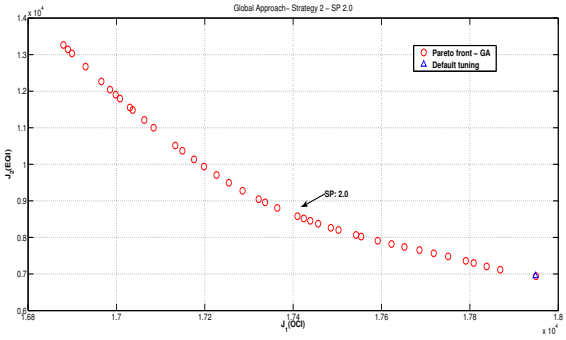


Figure 9: Pareto Front on Global Approach- Strategy 2

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

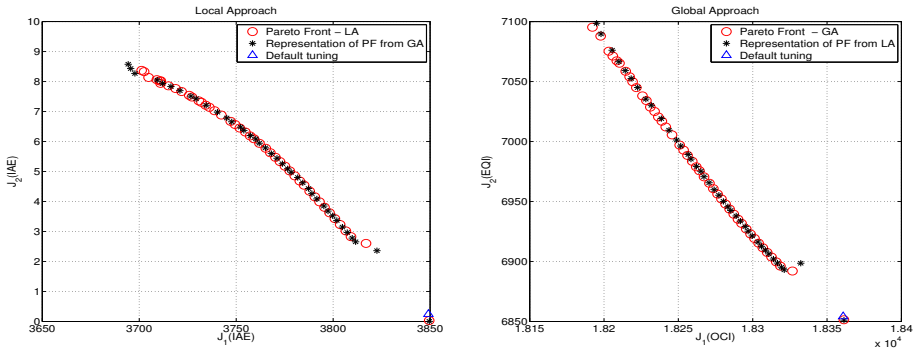


Figure 6: Correspondence between Local and Global Approach-Strategy 1

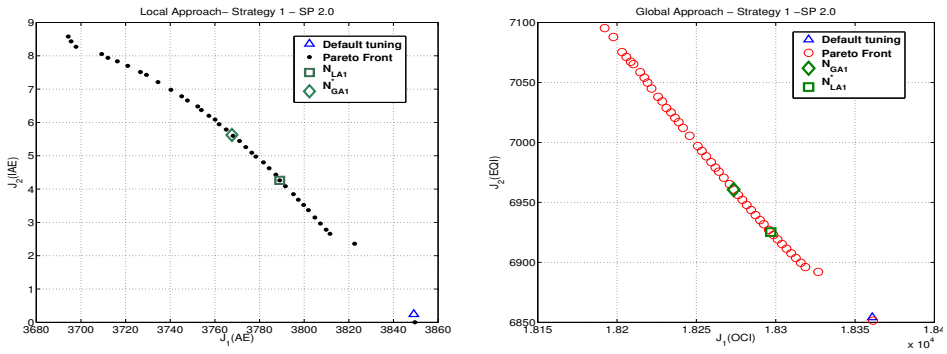


Figure 7: Controller selection based on Nash bargaining solution - Strategy 1

Furthermore, in this strategy, it is also observed a correspondence between the optimal solution of the local and global approach (Figure 10). As in the previous case, The values of OCI and EQI decreases, as do the value of AE and IAE of an optimal solution.

Controller selection. N_{LA_2} and N_{GA_2} are the tunings chosen, using Nash bargaining solution [1], from the local and global approach respectively. While $N^*_{LA_2}$ is the representation of N_{LA_2} in the general approach and $N^*_{GA_2}$ the representation of N_{GA_2} in local approach. As shown in figure 11, $N^*_{GA_2}$ presents an increment of 2.41 % of AE but a reduction of 6.24 % of IAE respect to $N^*_{LA_2}$. While $N^*_{LA_2}$ presents a reduction of 0.61 % of OCI level but an increment of 7 % of EQI level respect to N_{GA_2}.

5 Conclusions

The present work has applied the ϵv-MOGA algorithm to wastewater treatment process to formulate different multi-objective problem formulations and to solve trade-offs solutions for both local and global perspective. It allows us to analyze controller selection considering these two frameworks. Thus led us to the following findings:

The family of optimal controller solutions obtained maintain their optimality regardless of the framework in which they are evaluated. This fact allows us to choose a tune only thinking about local criteria, with the certainty that this solution is also optimal under global criteria. Nevertheless, the distribution over pareto frontrier varies depending on the framework in which it is evaluated, giving diferent trade-offs. Nash bargaining solution was used to select a tune from the pareto frontier of both the local and global approach. The chosen tuning gives a balanced trade-off between the objective function of the approach slected; whereas on the other one, prioritizes one of the conflicting objectives.

In addition, it was observed that the default tuning for the dissolved oxygen controller given by BSM1 is an optimal solution for both strategies, prioritizing the quality over the associated cost.

References

[1] Aumann, R. and S. H. (ed.) (1994) Handbook of game theory with economic applications. Elsevier.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

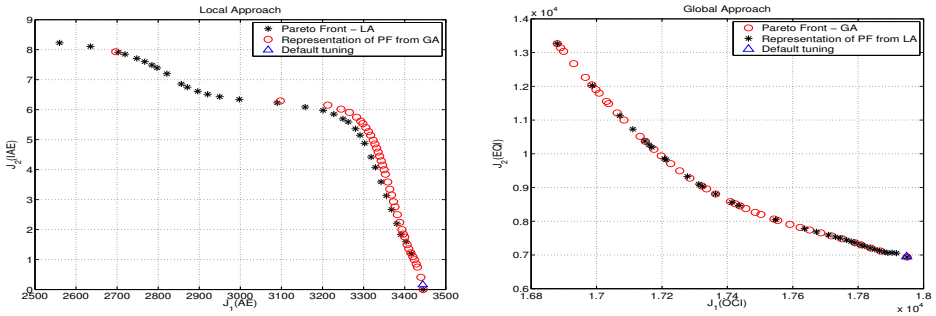


Figure 10: Correspondence between Local and Global Approaches- Strategy 2

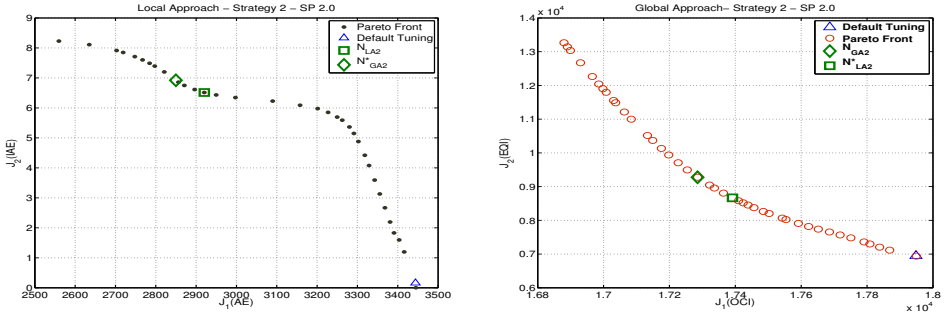


Figure 11: Controller selection based on Nash bargaining solution- Strategy 2

[2] Coello, C. , Lamont G., Van Veldhuizen, D. (2007) Evolution algorithms for solving Multi-objective problems. Springer. Second Edition.

[3] Coop, J. B. (2002). The Cost Simulation benchmark: Description and simulator manual (COST Action 624 and Action 682). Luxembourg: Office for Official Publications od the European Union.

[4] Henze, M., Grady, C. P. L., Jr., Gujer, W., Marais, G. v. R., Matsuo, T. (1987) Activated sludge model No. 1. IAWPRC scientific and technical reports no. 1. London, UK. IWA Publishing.

[5] Herrero, J. M. (2006) Non-Linear robust identification using evolutionary algorithms. PhD thesis, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.

[6] Herrero, J.M. , Martínez, M., Sanchis, J., and Blasco, X. (2007) Well-Distributed Pareto Front by Using the epsilon-MOGA Evolutionary Algorithm. Lecture Notes in Computer Science, 4507, pp. 292-299, 2007. Springer-Verlag. (ISSN: 0302-9743)

[7] Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K., Zitzler, E. (2002) Combining convergence and diversity in evolutionary multi-objective optimization. Evolutionary computation 10(3), 263-282.

[8] Martínez, M., Herrero, J.M., Sanchis, J., Blasco, X., and García-Nieto, S. (2009) Applied Pareto multi-objective optimization by stochastic solvers. Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 22 pp. 455 - 465 (ISSN:0952-1976).

[9] Olsson, G. (2008). Process Control. Chapter in Biological Wastewater Treatment - Principles, Modelling and Design (M. Henze, M. van Loosdrecht, G. Ekama, D. Brdjanovic, Editors) UNESCO, IWA Publishing, London.

[10] Olsson, G. and Newell, B. (1999). Wastewater Treatment System. Modelling, diagnosis and Control. IWA Publishing, Lodon.

[11] Takacs, Patry, Nolasco. (1991) Dynamic model of the clarification-thickening process. Water Research, 23(2/3), 111-132.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Entorno de desarrollo integrado para robots mini-humanoides basado en modelado por componentes

Félix Rodríguez Cañadillas (ferodrig@ing.uc3m.es)
Marcos Arjonilla Viñarás (100070820@alumnos.uc3m.es)
Alberto Jardón Huete (ajardon@ing.uc3m.es)

Resumen

En este artículo se muestra la implementación de un entorno de desarrollo integrado para robótica mini-humanoide. Con el desarrollo de este proyecto se pretende que los algoritmos de control creados para los robots mini-humanoides puedan ser probados en un simulador antes de ser incorporados al procesador real. Además, el entorno de desarrollo creado tendrá un diseño modular que permita la reutilización de los elementos software, la trazabilidad en las pruebas y la generación sencilla de algoritmos. Posteriormente, se mostrará un caso de uso que permita comprender el funcionamiento del entorno de desarrollo creado.

Palabras Clave: IDE, Mini-humanoide, MBD, CEABOT, YARP, OpenRave.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la utilización de entornos de desarrollo integrado (IDE) dedicados al desarrollo de algoritmos robóticos han aumentado considerablemente. La mayoría de estos entornos de desarrollo son entornos propietarios de un robot especifico y no pueden ser utilizados para el desarrollo de cualquier robot. Además, el desarrollo de los algoritmos no es modular complicando la reutilización de software.

Por otro lado, la incipiente tendencia a crear entornos de desarrollo que permitan la generación automática de código y la posibilidad de realizar pruebas HIL (Hardware-in-the-loop), hacen muy atractiva la posibilidad de crear un entorno de desarrollo integrado con todas estas características.

Dentro del grupo de robótica mini-humanoide de la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid, ASROB [1], se planteo la posibilidad de crear un entorno de desarrollo integrado que permitiese la creación de algoritmos de una forma sencilla, basado en las características nombradas anteriormente. El principal objetivo del grupo de robótica mini-humanoide es la participación en el concurso CEABOT [4].

La plataforma comúnmente utilizada por el grupo de robótica mini-humanoide es el robot Bioloid [9] de Robotis, el cual puede observarse en la figura 1, que aunque tiene su propio IDE, este resulta complicado de utilizar ya que la generación de los algoritmos se realiza mediante un lenguaje de programación propio y no intuitivo. Además, la utilización de la plataforma hardware del Bioloid limita la posibilidad de utilizar un gran número de sensores de tal forma que el desarrollo de los algoritmos suele ser pobre y de poca complejidad.

Figura 1: Imagen del robot Bioloid de Robotis.

Por tanto, se decidió utilizar una nueva plataforma hardware que aumentase las capacidades sensoriales del robot, lo cual hizo que el IDE propietario de Robotis ya no fuese útil para el desarrollo de los algoritmos de control. De esta manera, se planteo la creación de un nuevo IDE que proporcionase nuevas características como son la reutilización de software, la simplificación de las pruebas y la generación de pruebas HIL.

A continuación se realizará un estudio de los IDEs disponibles en el mercado, así como de las técnicas de modelado que aseguren la reutilización de software.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se verán los entornos de desarrollo integrado que existen en el mercado, así como las

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

principales características del modelado basado en componentes.

2.1 ESTADO DEL ARTE EN MODELADO BASADO EN COMPONENTES

Actualmente el diseño de algoritmos mediante el modelado basado en componentes es utilizado en la mayoría de sectores industriales y en el desarrollo de software entre otros, esto se debe a las grandes ventajas que presenta frente a procesos de modelado y diseño convencionales. Esto no quiere decir que no presente inconvenientes que provoquen que en determinadas situaciones no sea aplicable.

Hoy en día la complejidad y el tamaño de las diferentes aplicaciones crece rápidamente siendo demandados productos de muy alta calidad, que implican una gran complejidad en su desarrollo, y siempre en el menor tiempo posible. Para ser capaces de cumplir con las expectativas es imprescindible desarrollar aplicaciones, en las que se asegure su reutilización, para su futura integración en nuevos productos. Este es el objetivo que persigue el modelado basado en componentes. Además gracias a este modelo de desarrollo se logra reducir costes, tiempo y esfuerzos de desarrollo del software, a la vez que ayuda a mejorar la fiabilidad, flexibilidad.

Los profesionales del mundo de la ingeniería del software, utilizan actualmente la forma en que otras ingenierías llevan resolviendo sus problemas desde hace casi un siglo, como pronostico Chambers [3], se estaba convirtiendo en una necesidad el importar a este ámbito el concepto de componente como bloque constructivo. Estos componentes software son diseñados de tal forma que se puedan utilizar en multitud de aplicaciones sin tener que ser modificados, permitiendo la creación de nuevos componentes y aplicaciones a partir de otros preexistentes.

La definición de un componente software es la siguiente: “Un componente es una unidad binaria de composición de aplicaciones software, que posee un conjunto de interfaces y un conjunto de requisitos, y que ha de poder ser desarrollado, adquirido, incorporado al sistema y compuesto con otros componentes de forma independiente, en tiempo y espacio”.

Tras la definición mostrada en el párrafo anterior, se ha de analizar el concepto desde tres perspectivas diferentes, que lo definirán de una manera completa. Estas tres perspectivas fueron definidas en [2], y son totalmente necesarias para poder comparar los distintos modelos de componentes. Estas perspectivas son: perspectiva de empaquetamiento, perspectiva de servicio y perspectiva de integridad.

Entre sus principales ventajas cabe destacar los descritos a continuación:

- Funcionalidad mejorada
- Reutilización del software.
- Simplifica las pruebas.
- Simplifica el mantenimiento del sistema.
- Mayor calidad.
- Ciclos de desarrollo más cortos.
- Mejor ROI.

Los inconvenientes derivados de este tipo de desarrollos son los siguientes:

- Genera mucho tiempo de desarrollo inicial.
- Genera mucho trabajo adicional.

Como hemos visto en este estudio, la utilización del modelado basado en componentes nos asegura la reutilización de software, una de las premisas básicas al comienzo de este proyecto.

2.2 ESTADO DEL ARTE EN ENTORNOS DE DESARROLLO

En la actualidad se dispone de una gran variedad de entornos de desarrollo integrado que permiten realizar simulaciones de robots en ambiente tridimensionales, poniendo a nuestra disposición el uso de sensores y actuadores con los que compondremos nuestro robot y se podrá interactuar con el entorno de simulación.

Uno de los entornos de desarrollo integrados más utilizados dentro del campo de la robótica es Webots [13]. Se trata de un simulador que además viene acompañado de un paquete completo de software profesional para modelar, programar y simular robots móviles entre los que se incluyen los robots mini-humanoides. Una de las desventajas que tiene este IDE es que no se puede realizar un desarrollo basado en componentes y por tanto la reutilización de software no es viable.

Otro de los entornos de desarrollo más utilizados es Microsoft Robotics Developer Studio [6] o el entorno de desarrollo Open Architecture Humanoid Robotics Plataform [7]. Se tratan de entornos de desarrollo altamente escalable diseñados para la creación, programación y simulación de diferentes plataformas robóticas entre las que se incluye la creación de mini-humanoides. Al igual que sucede con el anterior IDE, estos entornos de desarrollo no permiten la creación del modelado basado en componentes, por tanto no es posible utilizar en este proyecto.

Existen simuladores como SimRobot [10] que aunque no son entornos de desarrollo integrado, ofrecen muchas posibilidades de simulación robótica. La principal característica de este simulador es que puede soportar todo tipo de robots móviles entre los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

que se incluyen los robots mini-humanoides que son sobre los que se centra el desarrollo de este proyecto. Otro simulador es Marilou Robotics Studio [5]. Este entorno de simulación, permite de manera análoga al resto de simuladores analizados, modelar las diferentes piezas de las que se compondrá el modelo del robot definitivo. Además permite crear ambiente o escenarios de simulación en 3D, para que los robots móviles, mini-humanoides, brazos articulados y robots paralelos puedan funcionar en condiciones reales. Estos simuladores pueden ser interesantes de usar en el caso de que se separe el desarrollo de algoritmos basados en componente y la simulación.

Como se ha visto en este estudio, existen numerosos entornos de desarrollo integrado aunque ninguno de ellos se adapta a las características que buscamos para este proyecto. A continuación, se mostrará el diseño del IDE implementado para este proyecto, además de las herramientas utilizadas para la implementación del mismo.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL IDE

En este capítulo se mostrará el diseño e implementación del entorno de desarrollo que se plantea para este proyecto, además de las herramientas utilizadas para tal desarrollo.

3.1 DISEÑO DEL ENTORNO DE DESARROLLO

El entorno de desarrollo integrado desarrollado para este proyecto esta basado en el modelado basado en componentes.

En la figura 2, se puede observar el diseño arquitectónico del entorno de desarrollo de este proyecto.

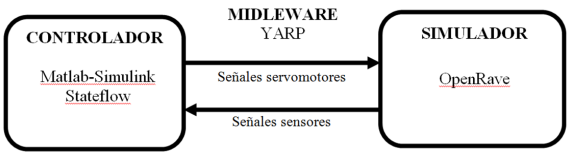


Figura 2: Diseño del IDE de este proyecto.

Como se observa en la figura 2, el entorno de desarrollo propuesto para este proyecto esta dividido en tres partes claramente diferenciables. La primera de estas partes es el controlador donde se desarrollaran los algoritmos de control que posteriormente se cargarán en la placa controladora del robot.

La segunda de las partes es el simulador en el cual se simula tanto la física del robot como los sensores y actuadores del mismo. Además, se simula el entorno de trabajo.

La tercera de las partes que componen el IDE es el middleware de comunicaciones encargado de conectar el controlador y el simulador.

A continuación, se muestran las herramientas utilizadas para la implementación del entorno de desarrollo propuesto en el diseño arquitectónico.

3.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE UTILIZADAS

En este apartado se verán las diferentes herramientas utilizadas para la implementación del entorno de desarrollo integrado para el robot mini-humanoide Bioloid.

La principal herramienta seleccionada para el desarrollo de nuestro IDE, es la herramienta de modelado basado en componente, que en este caso se determino que fuese Simulink [11]. Además, Simulink ofrece la posibilidad de utilizar librerías adicionales para el desarrollo de algoritmos de control. Una de las librerías más interesantes para el desarrollo de algoritmos sencillos es la librería llamada StateFlow [12]. Esta librería proporciona un entorno para modelar y simular lógica de decisión combinatoria y secuencial basado en maquinas de estado y diagramas de flujo.
Por otro lado, las últimas versiones de Simulink ofrecen la posibilidad de generar ejecutables para placas de bajo coste como Arduino, BeagleBoard o Raspberry Pi. Esto es una gran ventaja a la hora de general de forma sencilla algoritmos de control, así como a la hora de generar pruebas HIL.

Otra de las herramientas utilizadas para la implementación del entorno de desarrollo es el simulador. El simulador seleccionado para este desarrollo es el simulador OpenRave [8]. Su principal ventaja y por la que ha sido elegido para el desarrollo de este es proyecto es su gran versatilidad y su arquitecturas abierta basada en componente, que permite que la comunidad de usuarios e investigadores del sector de la robótica compartan, comparen y mejoren tanto los algoritmos como los modelos creados para este entorno.

Como estamos utilizando diferentes herramientas para el desarrollo del algoritmo y la simulación de la plataforma robótica y el entorno, es necesaria la utilización de un middleware de comunicaciones. En robótica, un producto muy útil y ampliamente utilizado es YARP [14]. Se trata de un conjunto de bibliotecas, protocolos y herramientas para mantener los módulos y dispositivos conectados entre sí a

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

través del protocolo TCP/IP. Se trata de un producto middleware, ya que en ningún momento está controlando el sistema sino solamente enviando datos entre diferentes dispositivos que serán los encargados de actuar en función de los datos recibidos, por tanto no es un sistema operativo.

Una vez visto el diseño arquitectónico del entorno de desarrollo y las herramientas utilizadas para la implementación del mismo, se verá un caso de uso para comprender el funcionamiento de este entorno de desarrollo.

4 CASO DE USO

Para comprobar el entorno de desarrollo implementado, se ha creado un caso de uso basado en la prueba de navegación del concurso de robótica mini-humanoide CEABOT.

Para el desarrollo de los algoritmos de navegación, se ha decidido basar el núcleo central del control del robot mini-humanoide sobre una máquina de estados, ya que además de cumplir con la misión requerida, tiene una característica muy importante que es la escalabilidad o trazabilidad. Gracias a dicha característica resulta muy sencillo modificarla de cara a cumplir las diferentes misiones que se proponen dentro de la competición CEABOT ya sea incorporando nuevos estados o diferentes sensores (entradas).

En primer lugar se analiza el problema en cuestión. Los objetivos de nuestra máquina de estados que posteriormente se traducirán a (Entradas/ Salidas/ Estados) son los siguientes.

- El robot ha de andar recto en caso de que no encuentre ningún obstáculo en su camino.
- El robot ha de andar hacia la derecha en caso de que encuentre un obstáculo situado a su izquierda que le obstruya el camino, o bien en el caso que encuentre un obstáculo enfrente y tenga más espacio para evitarlo por la derecha que por la izquierda.
- El robot ha de andar hacia la izquierda en caso de que encuentre un obstáculo situado a su derecha que le obstruya el camino, o bien en el caso que encuentre un obstáculo enfrente y tenga más espacio para evitarlo por la izquierda que por la derecha.
- Una vez analizado el problema a resolver se pasa a las definiciones de los estados, entradas y salidas que se utilizarán en la implementación de la máquina de estados de Mealy, y por último se mostrar la tabla de transiciones donde se analizarán con detalle los resultados obtenidos, previamente a su implementación dentro de Stateflow.

Las entradas de la máquina de estados se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1: Entradas de la máquina de estados.

Entradas			
w	v	u	Significado
0	0	0	No hay obstáculos
0	0	1	Obstáculo enfrente
0	1	0	Obstáculo izquierda
0	1	1	Obstáculo enfrente izquierda
1	0	0	Obstáculo derecha
1	0	1	Obstáculo enfrente derecha
1	1	0	Obstáculos izquierda y derecha
1	1	1	Obstáculo izquierda derecha y enfrente

Las salidas de la máquina de estados se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2: Salidas de la máquina de estados.

Salidas		
S_1	S_0	Significado
0	0	Parar
0	1	Andar a la izquierda
1	0	Andar a la derecha
1	1	Andar recto

Los estados de la máquina de estados desarrollada para el caso de uso se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3: Estados de la máquina de estados.

Estado		
Q_1	Q_0	Acción
0	0	Estado 0 --> Parado
0	1	Estado 1 --> Girando hacia la izquierda
1	0	Estado 2 --> Girando hacia la derecha
1	1	Estado 3 --> Andando recto

Tras un análisis exhaustivo de las tablas 1, 2 y 3 se pasó al cálculo y posterior simplificación de las funciones de transición dando resultado a los valores que se hace necesario representar en cada una de las transiciones entre los diferentes estados. En concreto para cada una de las transiciones se analizan las entradas recibidas y las salidas que se han de enviar al cambiar de un estado a otro o bien al mantenerse en el mismo estado.

Una vez definidos todos los valores de las transiciones entre estados así como el estado inicial y el estado al que ha de pasar, se realizó un boceto con la representación de la máquina de estados completa para posteriormente representarla dentro del módulo de Simulink, con la librería Stateflow. La máquina de estados definitiva es la que se muestra en la figura 3.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

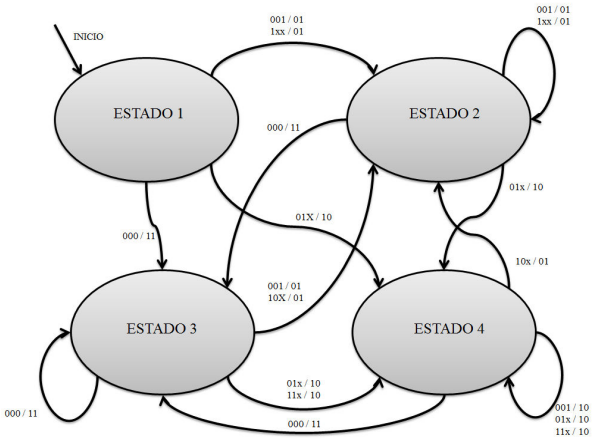


Figura 3: Representación de la Máquina de Estados de Mealy.

La máquina de estados mostrada en la figura 3 ha sido implementada con StateFlow, tal y como se muestra en la figura 4.

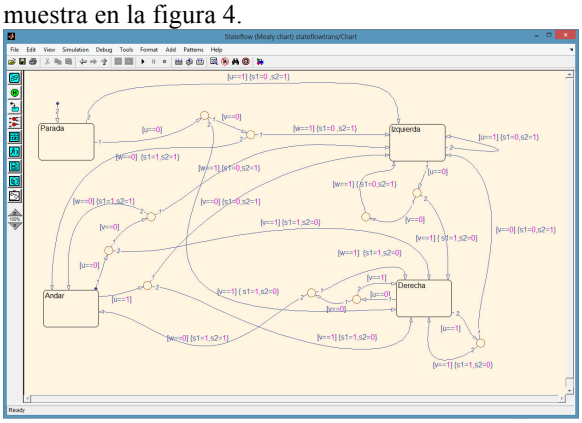


Figura 4: Máquina de Estados implementada en StateFlow.

El siguiente paso es la configuración del simulador. Lo primero que se debe realizar es la carga del entorno, que se hace mediante la incorporación del entorno en formato .wrt que ha sido diseñado previamente mediante herramientas de diseño 3D. Si se lanzase el simulador en este momento, este nos mostraría lo que se observa en la figura 5.

Figura 5: Captura del simulador OpenRave con el entorno cargado.

El segundo paso que se debe realizar para la configuración del simulador es la carga del robot. Esta carga se realiza de forma similar a la carga del entorno y si ejecutásemos el simulador en este momento se podría observar lo que muestra en la figura 6.

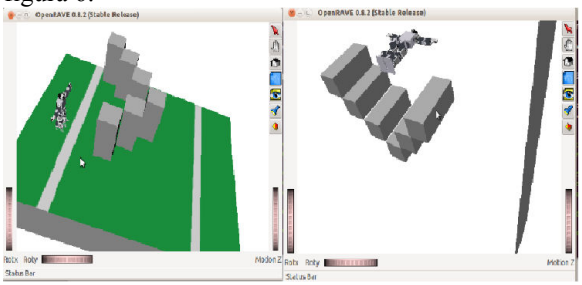


Figura 6: Simulador OpenRave con el robot y el entorno cargados.

Por último, se deben configurar los sensores del robot. OpenRave ofrece una gran variedad de sensores que pueden ser utilizados para cualquier desarrollo. En este proyecto, se han utilizado tres sensores de infrarrojos para la detección de los obstáculos. En la figura 7 se puede observar como han sido posicionados dichos sensores.

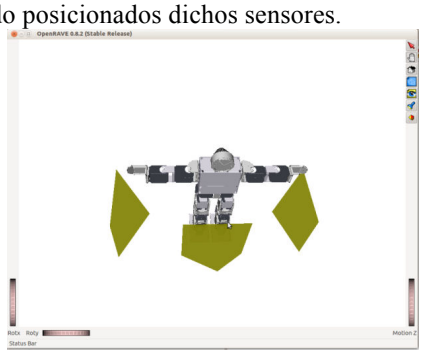


Figura 7: Robot con sensores en el simulador OpenRave.

El último paso es la configuración del middleware de comunicaciones basándonos en las entradas y salidas de la máquina de estados. Para ello, se debe configurar el middleware de comunicaciones en el controlador y en el simulador.

La configuración del middleware de comunicaciones en el simulador se realiza mediante la creación de los puertos dentro de los archivos XML de configuración de OpenRave.

Mediante la utilización del bloque de Simulink llamado “m-funtion” se crea un script de Matlab en el cual se realiza la conexión con el servidor de YARP y se configuran los puertos y los mensajes tanto de entrada como de salida basándose en las entradas y salidas de la máquina de estados. Además, se realizan las conexiones entre los puertos del controlador y los puertos del simulador.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Con esto, se habrá preparado toda la configuración del entorno de desarrollo y se podrá comenzar con la realización de las pruebas de validación de la misión, en concreto se comprobará que el robot es capaz de navegar por el entorno de obstáculos sin chocar con ninguno de ellos.

5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha planteado el diseño de un entorno de desarrollo integrado para el desarrollo de algoritmos de control de un robot mini-humanoide. Gracias al estudio de los diferentes entornos de desarrollo integrado que existen en el mercado se ha podido determinar la principales características de los entornos de desarrollo, así como sus ventajas y desventajas. Además, gracias al estudio del modelado basado en componentes, se han comprendido las principales características de este campo de diseño.

Con la implementación del entorno de desarrollo integrado se ha conseguido tener una herramienta completa en la cual se pueden realizar pruebas de validación de la misión de una forma sencilla e intuitiva. Estas pruebas son más rápidas de ejecutar que las pruebas clásicas con el robot real, ya que la utilización del simulador agiliza este tipo de pruebas.

Cabe destacar que este es un proyecto que se encuentra en proceso de desarrollo y que en este momento se está trabajando en la realización de pruebas con hardware-in-the-loop para placas de bajo coste.

Agradecimientos

Los investigadores de este proyecto quieren agradecer esta investigación al proyecto RoboCity2030-II-CM(S2009/DPI-1559), financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciados por los Fondos Estructurales de la UE. Especial agradecimiento para las personas de ASROB por su ayuda en la configuración y la realización de ensayos.

Referencias

[1] Asociación de Robótica Universidad Carlos III de Madrid. Disponible online en Junio de 2014: http://asrob.uc3m.es/index.php/Mini-Humanoide

[2] Brown, A.: Building Systems from Pieces with Component-Based Software Engineering. Volume Constructing Superior Software, Sams, 1999. Capítulo 6.

[3] Chambers, C.: «Towards reusable, extensible components». ACM Computing Surveys, 1996, p. 192.

[4] Concurso de robótica mini-humanoide CEABOT. Disponible online en Junio de 2014: http://www.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/10/CEABOT/index.htm

[5] Marilou Robotics Studio. Disponible online en Junio de 2014: http://www.robotic-lab.com/blog/2007/06/14/marilou-robotics-studio-simulador-robotico/

[6] Microsoft Robotics Developer Studio 4. Disponible online en Junio de 2014: http://www.microsoft.com/robotics/

[7] OpenHRP3. Disponible online en Junio de 2014: http://www.openrtp.jp/openhrp3/en/

[8] OpenRAVE. Disponible online en Junio de 2014: http://openrave.org/

[9] Robot Bioloid. Disponible online en Junio de 2014: http://www.robotis.com/xe/bioloid_en

[10] SimRobot. Disponible online en Junio de 2014: http://www.informatik.uni-bremen.de/simrobot/index_e.htm

[11] Simulink. Disponible online en Junio de 2014: http://www.mathworks.es/products/simulink/

[12] Stateflow. Disponible online en Junio de 2014: http://www.mathworks.es/products/stateflow/

[13] Webots. Disponible online en Junio de 2014: http://www.cyberbotics.com/overview

[14] YARP. Disponible online en Junio de 2014: http://eris.liralab.it/yarp/

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MÉTODOS BIO-INSPIRADOS EN EL CONTROL PID DE UN MOTOR

Jacobo Sáenz Valiente
Escuela Técnica Superior de Informática Universidad Nacional de Educación a Distancia, 28040-Madrid
jacobo.saenz@bec.uned.es

Matilde Santos
Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 28040-Madrid
msantos@ucm.es

Resumen

En este trabajo se aplican algunas estrategias de la inteligencia artificial (IA), en concreto métodos bio-inspirados, al control de velocidad de un motor de corriente continua en una configuración de tipo Ward Leonard. Se diseña un controlador inteligente híbrido, es decir, un controlador PID al que se aplican diversas técnicas heurísticas para sintonizar sus parámetros. También se incluye el diseño y aplicación de un control neuronal. Estas propuestas inteligentes de control se han simulado para comparar sus resultados.

Palabras Clave: Control inteligente, control PID, Enjambres de partículas (PSO), Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, Ward Leonard.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe gran demanda de maquinaria pesada para la construcción en altura, especialmente de grúas torre, las cuales son una herramienta fundamental para las edificaciones de este tipo. Por ello son un elemento donde la automatización encuentra una fuente de estudio para diseñar y aplicar técnicas avanzadas de control [1,3].

Este trabajo se centra en el sistema de elevación de carga de la grúa, por tanto se trata de un movimiento unidimensional en el eje z. Y en concreto se va a estudiar el motor que es el causante de ese movimiento. Los datos correspondientes a velocidades límite, potencias y cargas han sido obtenidos de las hojas de especificaciones técnicas de las gruas Liebherr [5].

El motor de corriente continua ha servido como benchmark en numerosas aplicaciones de control. Es un dispositivo que transforma corriente continua en energía mecánica a traves del campo eléctrico generado. De esta forma el par desarrollado y la corriente pueden relacionarse linealmente. Teniendo esto en cuenta el motor puede ser controlado en velocidad de dos maneras: a través del voltaje en el campo o en la armadura. En este último caso, que es el que se va a utilizar en este trabajo, el par viene dado por la siguiente ecuación diferencial y su correspondiente función de transferencia (1) [8]

$$T_m(t) = \left(J\frac{d}{dt} + F \right)\omega(t) \qquad (1)$$
$$T_m(s) = \left(J \cdot s + F\right)\Omega(s)$$

Haciendo uso de la ecuación (1) podemos obtener directamente la función de transferencia asociada (2):

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a \cdot s)\left(J \cdot s + F\right) + K_b K_m} \qquad (2)$$

Esta función de transferencia es bien conocida como modelo de motores de continua. Las constantes K_m y K_b están relacionadas con la potencia desarrollada por el motor.

El Ward Leonard es un sistema controlado por voltaje en la armadura, que proviene de un generador de corriente continua el cual utiliza alterna para generar potencia mecánica [3,7]. Este movimiento mecánico induce una corriente continua que se usa como entrada al motor. Se considera que el rotor gira a velocidad constante y por tanto corriente y voltaje se relacionan de forma simple, y puede obtenerse la expresión (3) eliminado las corrientes:

$$\frac{V_a(s)}{E_c(s)} = \frac{K_g}{(R_c + L_c \cdot s)} \qquad (3)$$

Esta función de transferencia nos da directamente el voltaje de la armadura del motor como salida. El diagrama de bloques del sistema completo en Simulink se muestra en la Figura 1. Puede apreciarse que se consideran generador y motor como sistemas idénticos por simplicidad.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

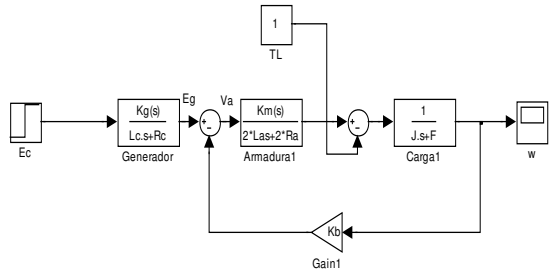


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema completo

Los parámetros utilizados para la simulación, que se muestran en la Tabla 1, corresponden a un motor de 150KW, con una diferencia de potencial en la armadura de 500 V y un voltaje de entrada en el escalón de 310 V. La velocidad angular máxima y la carga mínima C son parámetros habituales de una grúa torre [5].

Tabla 1. Parámetros de Sistema

Parámetro	Valor
R_a (Ω)	0.07571
L_a (H)	0.001986
R_c (Ω)	33.46
L_c (H)	3.499
J (Kg m^2)	0.9177
F (N m s)	0.02289
C (Nm)	> 1470
W (rad/s)	5.28
K_b	100

2 ESTRATEGIAS DE CONTROL

El sistema propuesto no es un sistema de gran complejidad, pero servirá para la comparación de técnicas inteligentes de control, por lo que no se ha considerado necesario incluir en el modelo efectos como rozamiento, reductores y otros términos que harían más complejo el análisis de la utilidad del las estrategias de control inteligente.

Aunque el sistema Ward Leonard se considera en sí mismo un controlador, la aplicación de un controlador adicional es necesaria debido a los problemas que presenta sin añadir una realimentación. Por ejemplo, en la figura 2 se muestra la salida de la simulación para una carga alta, donde se observa que las oscilaciones en la velocidad pueden llegar a ser un problema para el sistema.

Esta figura 2 muestra la respuesta a una entrada escalón de 310 voltios en el generador, que proporciona un voltaje de armadura en torno a los 520V. Este voltaje produce una velocidad angular de salida entre 0 y 5.2 rad/seg, la cual se realimenta con una ganancia de K = 100, de forma que pueda calcularse correctamente el error con la referencia.

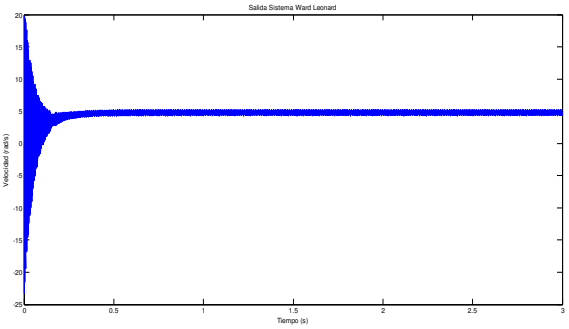


Figura 2. Salida (velocidad) del Ward Leonard

2.1 CONTROL PID

El PID es un controlador Proporcional Integral Derivativo bien conocido y muy utilizado en aplicaciones industriales. Por ello se utilizará como referencia en el trabajo y se probarán distintas estrategias bio-inspiradas para mejorar la sintonía de sus parámetros: Kp (constante proporcional), Ki (ganancia integral), y Kd (constante derivativa). Se ha utilizado una aproximación de la derivada en la implementación del PID para para eliminar las oscilaciones bruscas.

Simplemente con la inclusión de un PID se mejora la respuesta del motor. Los parámetros del PID para obtener esta respuesta se han obtenido haciendo uso de herramientas de Matlab SISOTOOL, con la cual podemos realizar una elección de los polos y ceros del PID basándonos en el lugar de las raices, observando al mismo tiempo la señal obtenida para una respuesta escalón. El criterio a la hora de seleccionar la posición de los polos y ceros ha sido minimizar la sobreelongación para evitar situaciones en las que la aceleración sobre la carga de la grúa pudiera ser peligrosa para la grúa, el cable o la propia carga.

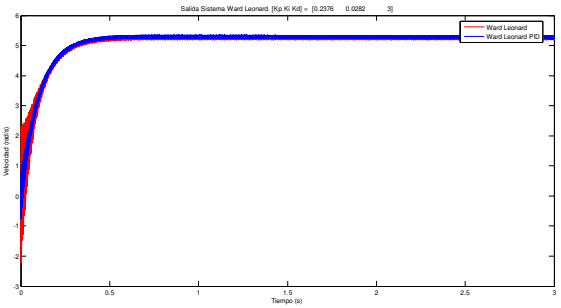


Figura 3. Comparación de la respuesta del motor con (línea azul) y sin (línea roja) controlador PID.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En la figura 3 podemos ver como la salida de ambos sistemas, con y sin PID, alcanzan la referencia de 5.2 rad/s, además la velocidad de la carga es más estable cuando se añade un controlador PID puesto que se reducen las oscilaciones a lo largo de toda la evolución en el tiempo.

2.2 ENJAMBRES DE PARTÍCULAS (PSO)

Dentro de las técnicas bio-inspiradas se encuentra el PSO (Particle Swarm Optimization) como método heurístico, que se basa en el comportamiento de los animales que forman enjambres, por ejemplo abejas y pájaros, en la búsqueda de alimentos [10]. Se supone que los animales pueden compartir información con el resto del enjambre.

Las trayectorias y procesos de búsqueda de estos animales se emulan según la ecuación (4) y la nomenclatura siguiente:

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot rand() \cdot \left(bestJ_i - J_i\right) + c_2 \cdot rand() \cdot \left(GbestJ_i - J_i\right) \quad (4)$$

Donde:

- Actual (*J*): ajustes actuales de los individuos,
- Mejor Actual (*bestJ*): ajuste del individuo con las mejores características en una iteración,
- Mejor Actual Global (G*bestJ*): ajuste del individuo con las mejores características durante todas las iteraciones anteriores,
- Nueva velocidad: se calcula el movimiento en función de los resultados globales
- Pesos y Parámetros: valores que definen el algoritmo.

Con la ecuación (4) se obtiene la velocidad, o más bien el incremento de la posición del individuo *i*. Los parámetros c_1 y c_2 se suelen tomar con un valor 2, pues esto implica un desplazamiento máximo de forma simétrica alrededor del mejor global, en el caso de c_2, o local, si es c_1. "*w*" representa el peso, o la importancia de la posición actual en el cálculo a efectuar. La asignación de estos parámetros es fundamental en la convergencia del algoritmo.

Aplicando este algoritmo para optimizar los parámetros de sintonía del PID, en la Figura 4 se muestra: a) posición inicial del enjambre (inicialización aleatoria), b) posición final del enjambre y c) trayectoria de un miembro del enjambre escalada, respectivamente.

Las ganancias obtenidas con este algoritmo son:

Kp = 0.3979 Ki = 0.0172 Kd = 0.6217

De estos valores se concluye que el sistema ha respondido mejor utilizando valores bajos de la acción integral, lo cual es lógico pues, como se ha dicho en la introducción, la salida presenta oscilaciones de una frecuencia relativamente alta.

La Figura 5 muestra la respuesta del sistema a una entrada escalón con ruido para los valores del PID obtenidos con PSO después de que las soluciones del enjambre se muevan a lo largo del espacio de trabajo 11 veces. Se puede observar cómo ha mejorado la respuesta de forma significativa:

- Ha disminuido la amplitud de las oscilaciones.
- Se ha estabilizado la señal.
- Al inicio no se produce sobreelongación.

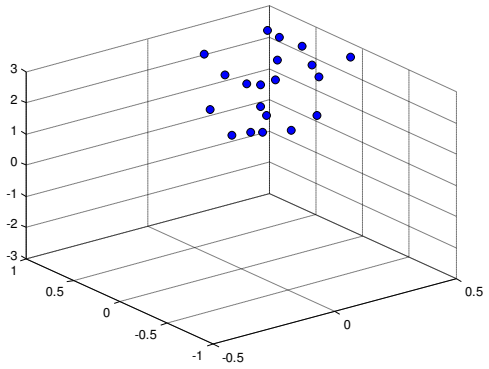


Figura 4. a) Posición inicial del enjambre

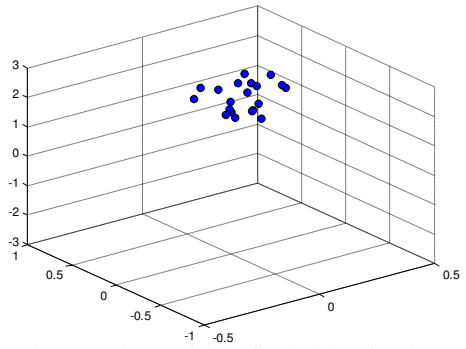


Figura 4. b) Posición final del enjambre

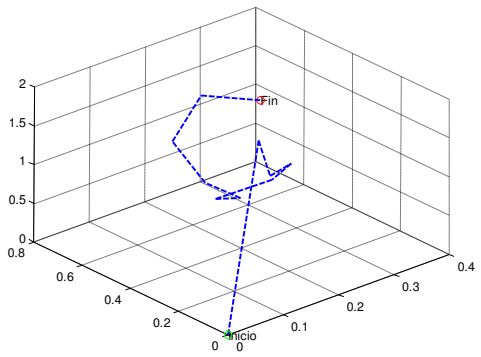


Figura 4. c) Trayectoria de un miembro del enjambre

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

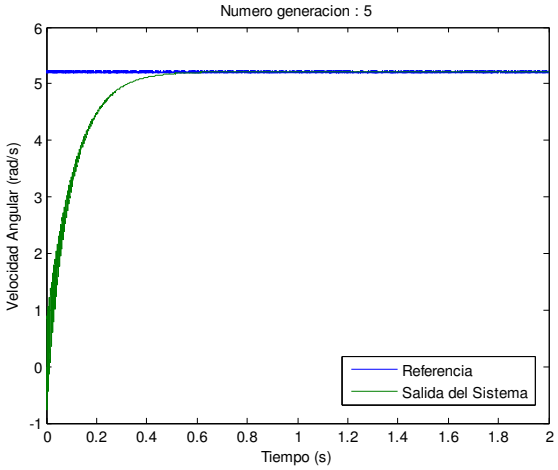


Figura 5. Respuesta del sistema con PID sintonizado mediante PSO.

2.3 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

Los algoritmos genéticos son métodos de optimización adaptativos bio-inspirados, que se basan en los principios de herencia, selección natural y mutación de la evolución de las especies. Para ello utilizan una población inicial de individuos, soluciones potenciales, en cuyos genes están codificados los parámetros clave del sistema [11].

En nuestro caso este código genético serían los tres parámetros del PID (cromosomas), los cuales se codifican en sistema binario con 10 bits cada uno. Tras la generación aleatoria de una población inicial comenzará el proceso de evaluación, en el que se obtendrá un valor de una función de ajuste que indicará el grado de aptitud como solución de cada individuo. Tras la evaluación y ordenación de los individuos, se seleccionan algunos de ellos para aplicarles operadores de cruce y mutación. Tras esto se genera una nueva población que se reevalúa, repitiendo de forma iterativa el ciclo. Para realizar este tipo de optimización se ha utilizado el software de la herramienta EVOCOM [4].

Se ha definido la función de ajuste como la integral en el tiempo del cuadrado del error en la salida por el tiempo durante toda la simulación (5). Se ha elegido este tipo de función objetivo porque da una importancia mayor al error en la salida en régimen permanente que en el transitorio.

$$J = \int [(Ref - Salida) \cdot t]^2 dt \qquad (5)$$

La configuración del algoritmos genético es la mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del Algoritmo Genético

Parámetro	Valor
Numero Genes	30
Tipo de Gen	Binario
Tamaño población	100
Parejas a cruzar	50
Supervivientes	10
Inmigrantes	5
Tipo de Cruce	1 punto de cruce
Probabilidad Cruce	0.8
Probabilidad Mutar	0.008
Numero Objetivos	1
Tipo de optimización	Minimización
Orden según ajuste	Lineal
Método de Selección	Ruleta
Método nueva Población	Elitista: los 10 mejores
Valor de las Mutaciones	Aleatorio con distribución uniforme

Aplicando el AG con los valores de la Tabla 2 y la función de ajuste (5) se obtienen los siguientes valores para las ganancias del PID (tras 100 generaciones):

$$Kp = 9.31\ 10^{-8} \qquad Ki = 0.1563 \qquad Kd = 0.9375$$

A continuación se muestra la gráfica obtenida con el PID sintonizado mediante AG (Figura 6).

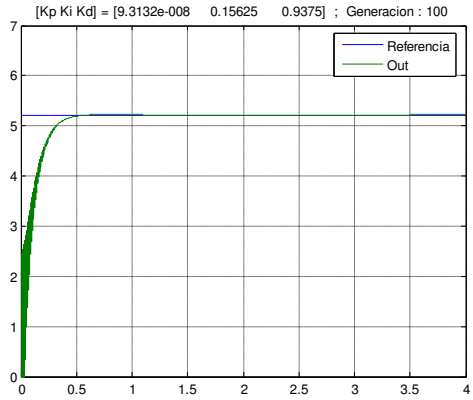


Figura 6. Respuesta del sistema con control PID sintonizado mediante AG

Ya en la generación 20 la salida del sistema era buena, por lo que el sistema ha convergido rápidamente. En la generación 100 todavía hay una mejora mayor.

El valor de la constante proporcional se ha hecho significativamente más pequeño que el caso del PSO, mientras que la acción integral y derivativa ha aumentado sustancialmente. Este algoritmo ha

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

proporcionado una solución mejor que el sistema inicial.

2.3 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Por último se ha decidido aplicar otra técnica de la Inteligencia Artificial, las redes neuronales artificiales (RNA) [9]. Es otro tipo de método bio-inspirado que trata de emular el funcionamiento de un cerebro humano. Son sistemas que se basan en la interconexión de numerosas unidades básicas de procesamiento, neuronas, con capacidad de aprendizaje. Es un buen ejemplo de procesamiento paralelo.

Las neuronas tienen la capacidad de estar activadas o desactivadas, en función de las señales que reciban a la entrada. Cada conexión tendrá una influencia menor o mayor según el peso que tenga asociado. Estos pesos se modifican con el objeto de que la RNA aprenda. Este proceso de aprendizaje es continuado ya que se basa en la información extraída del medio.

En el ejemplo del motor en el sistema Ward Leonard la RNA tendrá la labor de sustituir al controlador PID. Para ello se han extraído datos de entrada y salida del PID para que la RNA pueda aprender ese comportamiento. En este sentido, este controlador neuronal será específico para esta aplicación, el motor Ward Leonard.

2.3.1 Configuración del control PID-neuronal

La configuración de la RNA es fundamental para que converja y proporcione una buena respuesta. Se han utilizado RNAs para emular el comportamiento del controlador PID, de forma que la salida de la red se introduzca directamente en la entrada del sistema. Esto implica que se han utilizado RNAs con una capa de salida con una única neurona y una capa de entrada de 3 neuronas. El objetivo de esta configuración es tratar cada una de las ganancias del PID por separado.

En todos los casos las redes multicapa utilizan el algoritmo de aprendizaje de retropropagación. A continuación se muestran dos de las arquitecturas que dieron resultados satisfactorios en la fase de aprendizaje:

RNA1: Es una red neuronal de 3 capas:

- La capa de entrada con 3 neuronas con función de activación lineal (purelin).
- La capa oculta con 12 neuronas con función de activación de base triangular (tribas).
- La capa de salida con 3 neuronas, con función de activación lineal (purelin).

RNA2 Es una red neuronal de 4 capas:

- Capa de entrada: 3 Neuronas con función de activación lineal (purelin).
- Capa oculta: 5 neuronas con función de activación lineal (purelin).
- Segunda capa oculta: 7 neuronas con función de activación de base radial (radbas).
- Capa de salida: 3 neuronas con función de activación lineal (purelin).

Se han utilizado estas dos configuraciones pues son aquellas que devuelven una respuesta con menor error en comparación con la del PID, pero se han utilizado numerosas configuraciones diferentes, con mayor número de capas y neuronas, así como con diferentes funciones de activación.

Estas redes se someten a un proceso de entrenamiento en el cual los grupos de datos que vamos a utilizar en el entrenamiento y comprobación de la red neuronal son:

- Las entradas: 1) El error entre la salida y la referencia, 2) la derivada del error y 3) la integral.
- Las salidas: Se han obtenido de las tres salidas, proporcional, integral y derivativa cuya suma es la señal de control del PID.

Para poder utilizar estos vectores de datos se han dividido los datos de la siguiente forma:

- Como entradas/salidas de entrenamiento: El subvector con los valores de índices pares en los vectores de entrada/salida.
- Como entradas/salidas de comprobación: El subvector con los valores de índices impares en los vectores de entrada/salida

Una vez obtenidos los vectores se pasa al proceso entrenamiento de las redes:

Sobre la primera red RNA1 se realizo un entrenamiento usando los datos obtenidos durante las simulaciones. En la figura 7 puede verse la evolución del entrenamiento de la red, alcanzando un valor de ajuste de 0.001. Al incluir esta red en el sistema se obtiene la gráfica de la figura 8, donde la salida de velocidad no proporciona la velocidad angular esperada, en torno a 5.2 rad/s.

En el caso de la segunda red RNA2 se realizo un entrenamiento usando los mismos datos que el caso anterior. En la figura 9 puede verse la evolución del entrenamiento de la red, alcanzando un valor de ajuste de 0.0019, el cual no llegaba al valor necesario de aprendizaje.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

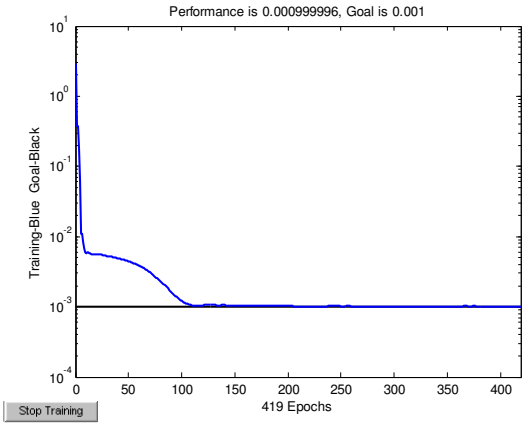


Figura 7. Curva de Aprendizaje de la RNA1.

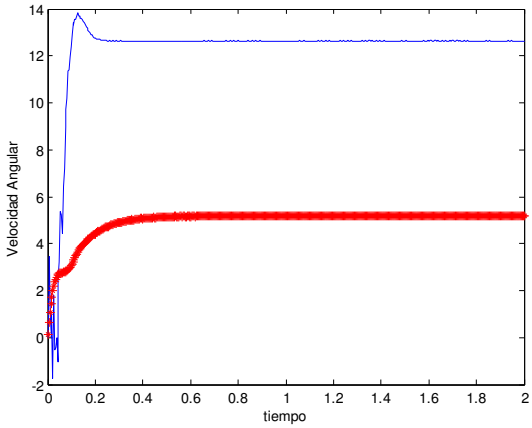


Figura 8. Salida del sistema con la RNA1 en comparación con la salida real de la planta.

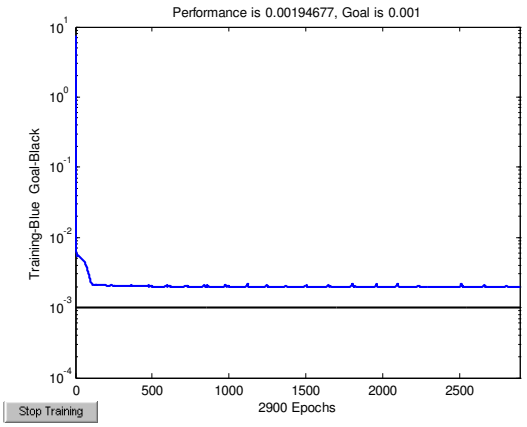


Figura 9. Curva de Aprendizaje de la RNA2.

Por tanto, aunque estas redes neuronales artificiales pueden llegar a aprender a funcionar como un PID en nuestro sistema, este aprendizaje no es suficiente para obtener un funcionamiento correcto de cara al control del sistema pues la salida del sistema completo no cumple con las condiciones requeridas ni alcanza la referencia.

3 CONCLUSIONES

Los algoritmos bio-inspirados, tanto evolutivos como neuronales, pueden ser utilizados en múltiples problemas de control gracias a su versatilidad y adaptabilidad.

En este trabajo se han utilizado tres ejemplos de algoritmos basados en procesos biológicos aplicándolos al control de velocidad de un motor Ward Leonard de una grúa torre.

La resolución de problemas mediante enjambres de partículas (PSO) ofrece la posibilidad de hacer una búsqueda en un espacio de soluciones limitado, donde la posición inicial del enjambre tiene una importancia grande en la convergencia del algoritmo en un óptimo global. En nuestro caso ha permitido optimizar el controlador PID de forma eficiente.

Los algoritmos genéticos (AG) han demostrado ser muy útiles también en este tipo de problema de sintonización de parámetros del controlador PID. Pueden obtenerse resultados cercanos al óptimo global en tan solo unas pocas generaciones.

Por último las redes neuronales han ofrecido un planteamiento diferente en el cual no se hace una búsqueda en el espacio de soluciones sino que se entrena la red para obtener un comportamiento conocido y deseado. En este trabajo se han utilizado diferentes configuraciones. Aunque se ha conseguido que algunas de ellas aprendieran, la salida del motor no era la esperada. Las oscilaciones de la señal, que podríamos simular en otro sistema como ruido, pueden ser una de las razones de este mal funcionamiento.

Otra solución que se puede plantear con problemas más complejos es realizar una búsqueda inicial mediante un algoritmo rápido, como podría ser PSO, para después mejorar los resultados habiendo acotado el rango de valores posibles utilizando los AG.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía y Competitividad con el proyecto DPI2013-46665-C2-1-R.

Referencias

[1] Andújar, J. M., Barragán, A. J., Gegúndez, M. E., & Maestre, M. (2007). Control borroso multivariable basado en heurística. Un caso práctico: grúa porta contenedores. Revista

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 4(2), 81-89.

2] Choudhary, A., Singh, S. A., Malik, M. F., Kumar, A., Pathak, M. K., & Kumar, V. (2012, January). Virtual lab: Remote access and speed control of DC motor using Ward-Leonard system. In Technology Enhanced Education (ICTEE), 2012 IEEE International Conference on (pp. 1-7). IEEE.

[3] Fernández Villaverde A., Santos M. (2006) Control de una grúa pórtico mediante redes neuronales, XXVII Jornadas de Automática, 1006-1011.

[4] A Versatile ToolBox for Solving Industrial Problems with Several Evolutionary Techniques. E. Besada-Portas, J.A. López-Orozco, B. Andrés-Toro. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control.International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMME). Spain, March 2002.

[5] Liebherr Grop (2014): http://www.liebherr.com/CC/es-ES/region-ES/default_cc.wfw/measure-metric

[6] Sarhan, H. (2014). Software-Based Speed Control of a DC Motor Using Pulse-Width Modulation. Control Theory and Informatics, 4(5), 72-81.

[7] Zhong, Q. C. (2013). AC Ward Leonard drive systems: Revisiting the four-quadrant operation of AC machines. European Journal of Control, 19(5), 426-435.

[8] *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, Theodore Wildi, Rodolfo Navarro Salas. 2007, Pearson Educación.

[9] Martín del Brío, B., Sanz Molina, A. (2006) Redes Neuronales y Sistemas Borrosos, Ra-Ma, España.

[10] Kennedy, J., Eberhart, R.C.: Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann (2001)

[11] Michalewicz, Z.: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag, New York (1992)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Diseño de una plataforma híbrida aéreo-terrestre para aplicaciones de inspección visual

Joan Pep Company, Alberto Ortiz
Departamento de Matemáticas e Informática
Universidad de las Islas Baleares
07122 Palma de Mallorca
joan.pep.company@gmail.com, alberto.ortiz@uib.es

Resumen

El continuo deterioro en instalaciones industriales causado por factores medioambientales o por propio desgaste implica realizar tareas de inspección continuamente. Actualmente, el uso de robots para realizar estas tareas de inspección esta creciendo debido a sus grandes ventajas, entre las que cabe destacar: reducción del coste y del tiempo de inspección, y el aumento de la seguridad del personal que realiza estas inspecciones ya que no han de estar físicamente en lugares peligrosos. Este artículo presenta el diseño de una plataforma híbrida para realizar tareas de inspección, cuya combinación aúna las ventajas de los robots aéreos y las de los robots terrestres. El diseño de este vehículo híbrido esta basado en un cuatrirotor modificado para poder convertirlo en un robot terrestre sin perder ninguna función propia de un robot aéreo. Además, el vehículo híbrido ha sido diseñado para poder incorporar diferentes configuraciones de sensores, así como un PC integrado a bordo del robot, el cual permite llevar a cabo ciertas tareas de forma autónoma a través de un conjunto de comportamientos específicos adaptados a cada tipo de inspección. Para finalizar, en este artículo se describe el modelo dinámico de los dos modos de navegación, evaluado mediante el balance de energías de Lagrange.

Palabras clave: Vehículo aéreo no tripulado, Vehículo híbrido aéreo-terrestre, Inspección visual

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones industriales, edificios, puentes y grandes buques se deterioran debido a factores medioambientales o por el desgaste ocasionado por el propio uso. Por esto, es necesario un mantenimiento periódico de estas instalaciones que garantiza su correcto funcionamiento y su seguridad. Actualmente, el uso de robots para tareas de inspección está en continuo crecimiento [1, 2]. Esto es debido a las grandes ventajas que estas plataformas suponen, entre las que se puede destacar la reducción de tiempo y los costes de inspección, así como el aumento de la seguridad del personal de inspección ya que no han de estar físicamente en el área a evaluar.

Este artículo describe el diseño de una plataforma híbrida para la realización de inspecciones en buques de gran tonelaje [3, 4]. El diseño propuesto es una plataforma capaz de proporcionar al inspector una primera impresión del estado de las estructuras metálicas del buque. Cabe destacar la versatilidad del diseño, debido a la gran capacidad de carga útil, la cual permite la incorporación de una gran variedad de combinaciones de sensores. Con estas múltiples combinaciones, la plataforma puede usarse para diferentes tareas de inspección.

Este vehículo híbrido incorpora las ventajas de un robot aéreo y un robot terrestre en una sola plataforma. Centrándose en la plataforma diseñada en términos de inspección, la principal ventaja del modo terrestre es el aumento del tiempo disponible de inspección así como del área a inspeccionar sin tener que reemplazar la batería; esto es debido a que el vehículo no ha de levantar su propio peso para desplazarse y por consiguiente la energía utilizada es inferior. Por otra parte, el modo aéreo permite evitar obstáculos volando sobre ellos, así como inspeccionar zonas remotas a las que un robot terrestre no podría llegar. Resultados experimentales demuestran que la duración de la batería en un vehículo híbrido puede ser hasta 6 veces superior usando el vehículo como robot terrestre, mientras que la distancia de alcance es cuatro veces superior [5].

El diseño de la plataforma híbrida realizado esta basado en dos modelos. El primero es el HyTAQ del Instituto de Tecnologia de Illinois [5], mientras que el segundo es un modelo comercial llamado Parrot MiniDrone. Ambos modelos se muestran en la figura 1.

Comparando los dos vehículos híbridos mencionados anteriormente, se puede observar que la mayor diferencia reside en la estructura que protege al cuatrirotor y que permite el desplazamiento terrestre. La ventaja de la estructura cerrada del HyTAQ es la mayor protección de los componentes internos, mientras que la gran ventaja de la estructura abierta del Parrot MiniDrone es que la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 1: (izda) Parrot MiniDrone, (dcha) HyTAQ.

estructura exterior no interfiere en el campo de visión (FOV) de las cámaras. Combinando estas dos estructuras se ha diseñado una estructura exterior que protege el interior de la plataforma mientras que también permite instalar, por ejemplo, un sistema de cámaras estéreo en forma vertical sin que la estructura interfiera en el FOV de las cámaras.

El resto del artículo se organiza tal como se detalla a continuación: la Sección 2 describe en detalle el diseño mecánico de las dos estructuras, la terrestre y la aérea, las cuales combinándolas forman un solo robot; la Sección 3 describe la electrónica del vehículo híbrido; la Sección 4 describe el modelo dinámico del vehículo híbrido, considerando los dos modos de navegación; la Sección 5 enumera las conclusiones y trabajos futuros relacionados con el desarrollo del vehículo.

2. Diseño mecánico

En el proceso de diseño de un cuatrirotor se pueden destacar tres parámetros restrictivos fundamentales. Tal como se cita en [6], estos tres parámetros corresponden a la masa máxima, la máxima envergadura y la relación de empuje/peso deseado (normalmente esta relación es 3:1, pero cuando se quiere un movimiento mas suave —por ejemplo cuando se embarcan cámaras—, es aconsejable usar una relación 2:1).

La masa máxima viene definida por la suma de la masa del chasis, la masa del grupo de propulsión, la masa de la batería y la masa de la aviónica, donde la aviónica hace referencia a los sistemas electrónicos encargados del control de bajo nivel de la aeronave. Para poder obtener el valor de la masa máxima primero se define el peso de la masa de la aviónica, que típicamente corresponde a la unidad de control de vuelo (FMU). Por otra parte, la placa de procesamiento adicional y los sensores han sido definidos como peso extra (payload). Una vez el peso del chasis del vehículo es conocido, se realizan iteraciones hasta conseguir una correcta relación entre el grupo de propulsión, las hélices y la batería necesaria para obtener la relación empuje/peso requerida y el tiempo de operación del vehículo.

Uno de los principales objetivos en el diseño mecánico de la plataforma es conseguir el mínimo tamaño posible del vehículo adaptándose a las necesidades que se han descrito anteriormente. En el diseño de un cuatrirotor, el tamaño total viene principalmente definido por el tamaño de las hélices. Por esta razón, se han elegido hélices de tres hojas, ya que se reduce su diámetro y por consiguiente el tamaño total del cuatrirotor. Modificando de n a m el número de hojas y considerando el mismo número de revoluciones por minuto y la misma velocidad de avance, el diámetro de la hélice varía tal como se muestra en la ecuación 1:

$$D_n = D_m \left(\frac{B_m}{B_n} \right)^{1/4} \tag{1}$$

En la ecuación anterior, B_i es el número de hojas y D_i es el diámetro de la hélice. Por otro lado, la experiencia ha demostrado que la eficiencia decrece cuando se incrementa el número de hojas (por ejemplo, de dos a tres hojas la eficiencia se reduce del 70 % al 67 %). Esta pérdida de eficiencia se debe a diferentes factores entre los que cabe destacar la turbulencia de aire generado debido a la mayor proximidad entre las hojas.

Tal como se describe en la ecuación 2, una hélice de tres hojas permite reducir el diámetro un 10 % respecto a una hélice de dos hojas:

$$D_3 = D_2 \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^{1/4} = D_2 \cdot 0{,}904 \tag{2}$$

Con el fin de centrarnos en las características de cada estructura por separado, a continuación, el vehículo se describe en dos partes: primero la estructura terrestre y luego la estructura aérea.

2.1. Estructura terrestre

La estructura terrestre ha sido diseñada lo mas ligera posible para no incrementar la masa máxima del vehículo. Esta estructura terrestre ha de satisfacer las siguientes necesidades: ha de ser rígida para poder desplazarse por el suelo sin deformarse, pero al mismo tiempo ha de ser capaz de absorber posibles impactos del vehículo y de esta forma proteger los componentes internos de posibles daños. Una de las soluciones a las necesidades comentadas anteriormente es la fibra de carbono. Este material es muy utilizado en la robótica aérea debido a su gran dureza, poco peso y elongación casi nula. Sin embargo, una de las desventajas es la poca deformación de este material respecto a una carga. Esta deformación es inversamente proporcional al módulo elástico, que en la fibra de carbono es de entre 30 y 50 GPa, lo cual provoca que la estructura terrestre no sea lo suficientemente flexible para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

absorber impactos. Por eso la fibra de vidrio, cuya deformación es superior debido a un módulo elástico entre 5 y 12 GPa, se adapta perfectamente a las necesidades del diseño. Para poder conseguir un buen amortiguamiento de impactos en el vehículo, se ha utilizado una combinación de fibras de vidrio de 2, 3 y 4 mm de sección.

Uno de los puntos débiles de la fibra de vidrio es el poco nivel de fricción que tiene. Con el objetivo de conseguir un giro controlado de las ruedas, un tubo de plástico envuelve las piezas de fibra de vidrio que tienen contacto con el suelo. Las varillas de fibra de vidrio se unen mediante piezas de polyactide (PLA) producidas por una impresora 3D.

2.2. Estructura aérea

La estructura aérea ha sido diseñada basándose en la estructura de un cuatrirotor. Esto es debido a la simplicidad y al reducido tamaño que ofrecen los cuatrirotores, comparándolos con otros multirotores como los hexarotores o los octorotores. Los cuatrirotores, como su nombre indica, se caracterizan por ser propulsados y comandados por cuatro rotores cuyas velocidades absolutas y relativas de unos respecto de los otros dan lugar al movimiento del vehículo. Frente a otros multirotores, los cuatrirotores presentan una nula capacidad de reacción cuando un motor deja de funcionar.

El diseño de un cuatrirotor se corresponde con una de las siguientes variaciones: configuración en forma de cruz (+), en forma de aspa (×) y en forma de H. La variación en forma de cruz es la idónea para acrobacias aéreas, pero no se adapta al diseño propuesto ya que, por una parte, la disposición de las hélices provoca que dos de sus brazos estén menos protegidos por la estructura terrestre y, por otra parte, limita el espacio disponible para la colocación de sensores a bordo. La variación en forma de H se caracteriza por tener el centro de gravedad (COG) a la misma altura que las hélices, lo cual provoca un menor tiempo de respuesta cuando se inicia una maniobra. La variación seleccionada para nuestro diseño corresponde a la forma en aspa con torre central. Esta torre permite albergar la aviónica y el procesador de alto nivel. Además, el COG se puede ajustar según la disposición de los componentes en la torre. Si la distancia del COG respecto al centro instantáneo de rotación (CIR) es muy pequeña, la estructura aérea puede rotar sobre si misma, mientras que, si esta distancia es muy grande, la eficiencia del vehículo en cualquiera de los dos modos de navegación disminuye, ya que el esfuerzo para realizar un movimiento de cabeceo (pitch) es mayor.

Para concluir este apartado, se ha de destacar que el diseño ha sido realizado buscando una sustitución rápida y fácil de las diferentes piezas en caso de colisión.

3. Diseño electrónico

La arquitectura de control del robot se puede dividir en dos partes: la primera esta ubicada en el vehículo, mientras que la segunda esta ubicada en una estación base. A bordo del vehículo hay dos unidades de procesamiento: una FMU y un PC empotrado (ver figura 3).

La FMU es la encargada del control de bajo nivel de la plataforma, como por ejemplo el control de postura del vehículo. En este proyecto, la FMU seleccionada es la Pixhawk Autopilot debido a la memoria adicional, y al alto rendimiento de la CPU. Mas detalladamente, las características más importantes de la FMU son: microcontrolador STM32F427 ARM Cortex M4 con DSP y acelerador por hardware basado en coma flotante (FPU), 168 MHz, 256 KB de RAM, 2 MB de memoria flash, y co-procesador de 32 bits STM32F103. Además esta placa incorpora una unidad de medición inercial (IMU) equipada con un sensor de presión barométrica y un giróscopo, un acelerómetro y un magnetómetro tri-axiales.

El PC empotrado, llamado procesador de alto nivel en la figura 3, es el encargado de procesar los datos de los sensores, de ejecutar los comportamientos autónomos del robot, así como los comportamientos necesarios para garantizar la seguridad de la plataforma y gestionar la comunicación inalámbrica con la estación base. La comunicación inalámbrica es administrada por ROS (Robot Operative System) [7] ejecutado sobre Linux Ubuntu. En esta aplicación, ROS desempeña un papel esencial al proveer al sistema de un *middleware* para el intercambio de mensajes entre procesos distribuidos de forma transparente.

Aparte de los sensores que incorpora la FMU, este vehículo híbrido ha sido diseñado para poder alojar diferentes configuraciones de sensores que permitan que cada tipo de inspección se lleve a cabo de forma satisfactoria. La configuración de sensores seleccionada alberga dos sensores de flujo óptico (uno orientado hacia delante y otro orientado hacia abajo), un conjunto de sensores de ultrasonidos para evitar colisiones, y un conjunto flexible de cámaras. Con esta combinación, el vehículo es capaz de realizar tareas de localización, construcción de mapas, detección y evitación de obstáculos, grabación de vídeo, etc.

La figura 3 muestra la electrónica del cuatrirotor y las conexiones con la estación base.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

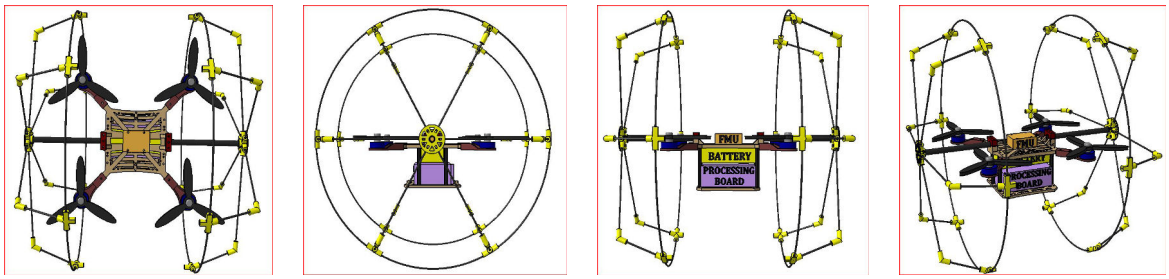


Figura 2: Diferentes perspectivas de la plataforma híbrida diseñada.

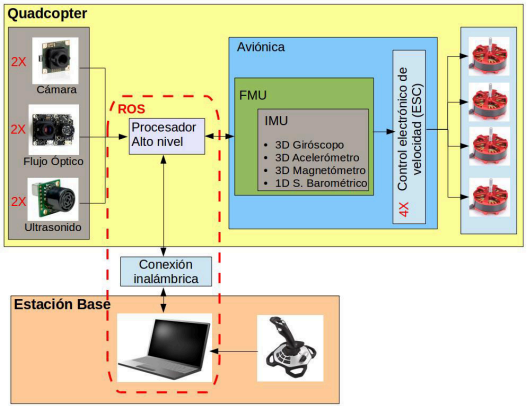


Figura 3: Diagrama de bloques de la electrónica de la plataforma y su relación con la estación base

4. Modelización del vehículo híbrido

Las siguientes secciones describen el modelo dinámico del vehículo, el cual resultará útil tanto para tareas de dimensionado y simulación, como para llevar a cabo el diseño del sistema de control.

4.1. Movimiento generado

El movimiento de la plataforma híbrida, en los dos modos de navegación, se realiza mediante rotores ubicados en las cuatro esquinas del cuatrirotor. Cada uno de los cuatro rotores tiene una hélice que gira solidaria a él, dos de estas hélices giran en sentido horario, mientras que las otras dos giran en sentido antihorario. En este tipo de plataforma, el control del movimiento del vehículo se obtiene modificando la velocidad de cada rotor respecto a los demás rotores. El hecho de que cada par de hélices gire en sentido contrario, provoca una cancelación del momento respecto al eje Z, permitiendo, por una parte, que el vehículo pueda volar recto y, por otra parte, incrementar la eficiencia y el tiempo de vuelo, ya que no es necesario un empuje extra para compensar la rotación no deseada. La relación de fuerza F_i y momento M_i de cada motor respecto a su velocidad angular w_i se muestra en las ecuaciones 3-4:

$$F_i = k_F w_i^2 \tag{3}$$

$$M_i = k_M w_i^2 \tag{4}$$

donde k_F y k_M corresponden a las constantes de fuerza y par del conjunto motor-hélice. Estos valores se obtiene empíricamente midiendo la relación entre la velocidad angular y la fuerza generada por el conjunto hélice-motor.

La fuerza ejercida por este conjunto y los ejes de referencia del sistema son detallados en la figura 4. Para poder realizar el análisis dinámico del sistema se han utilizado tres sistemas de coordenadas: cuatrirotor (x_q, y_q, z_q), rueda (x_r, y_r, z_r) y global (X, Y, Z).

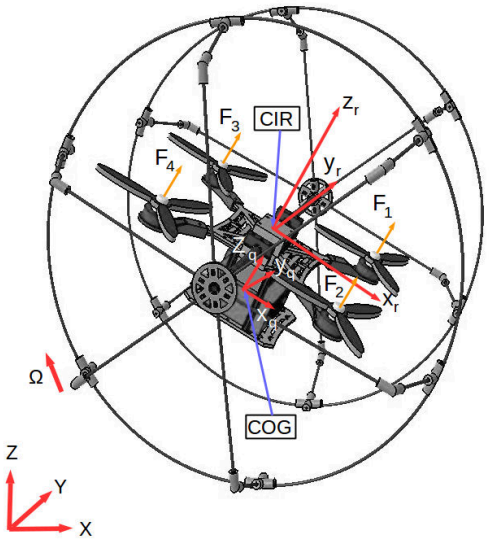


Figura 4: Fuerzas de los motores y sistemas de coordenadas asociados a la plataforma.

La entrada del sistema U en los dos modos de navegación se corresponde con el estado de los cuatro conjuntos motor-hélice. Esta entrada se puede representar de la siguiente forma: U_f corresponde a la fuerza ejercida en la dirección del eje Z del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cuatrirotor (z_q), mientras que U_ϕ, U_θ, U_ψ corresponde respectivamente a los momentos ejercidos sobre los ejes x_q, y_q, z_q. Tal como muestra la ecuación 5, actuando sobre la velocidad de los motores w_i se puede obtener el empuje del vehículo en z y los ángulos de alabeo (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw) deseados.

$$u = k_F \vartheta w_i \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} U_f \\ U_\phi \\ U_\theta \\ U_\psi \end{bmatrix} = k_F \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -L & L & L & -L \\ -L & -L & L & L \\ \frac{k_F}{k_M} & -\frac{k_F}{k_M} & \frac{k_F}{k_M} & -\frac{k_F}{k_M} \end{bmatrix}}^{\vartheta} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix}$$

donde L es la distancia del centro del cuatrirotor al centro de cada motor.

Cuando se está en modo terrestre, las ruedas del vehículo ruedan en el suelo usando solo la fuerza generada por el conjunto motor-hélice. La dirección y la velocidad de movimiento es gobernada por la relación de velocidades de cada rotor. Tan pronto como se quiere cambiar de modo de navegación, se cambia el control de la plataforma variando la relación de las velocidades del motor y por consiguiente las fuerzas ejercidas, permitiendo que el robot vuele.

4.2. Dinámica del sistema

Existen principalmente dos métodos para obtener las ecuaciones dinámicas de un sistema: el método de Lagrange, basado en el balance de energías, y el método de Newton-Euler, basado en el balance de fuerzas. Aunque los dos métodos llegan a las mismas ecuaciones, el modelo de Lagrange ofrece una solución con ecuaciones en forma cerrada, en las que se puede ver fácilmente la estructura completa y los términos que la componen en forma matricial.

Debido a la gran diferencia existente a nivel de modelo dinámico entre los dos modos de navegación del robot, ambos se describirán a continuación de manera independiente.

4.2.1. Modo de navegación aéreo

La dinámica de este modo de navegación ha sido publicada en numerosos artículos y libros entre los que cabe destacar [8] y [9]. Por esta razón, en este apartado solo se citarán las ecuaciones de la cinemática y la dinámica sin entrar en detalles.

La relación entre las coordenadas del sistema de coordenadas global (X, Y, Z) y el sistema de coordenadas del robot (x_q, y_q, z_q) se muestran en las ecuaciones 6-8 ($c\alpha$ y $s\alpha$ corresponden respectivamente a $\cos\alpha$ y $\sin\alpha$):

$$X = (c\psi c\theta)x + (c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi)y + (c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi)z \tag{6}$$

$$Y = (s\psi c\theta)x + (s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi)y + (s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi)z \tag{7}$$

$$Z = (-s\theta)x + (c\theta s\phi)y + (c\theta c\phi)z \tag{8}$$

El modelo dinámico del vehículo híbrido que describe las rotaciones de alabeo (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw) viene definido por el efecto giroscópico de la rotación del cuerpo, por el efecto giroscópico de la rotación de las hélices, y por los actuadores. Este modelo esta definido en las ecuaciones 9-11:

$$I_1^q \ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}(I_2^q - I_3^q) - J\dot{\theta}\Omega_r + u_\phi \tag{9}$$

$$I_2^q \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(I_3^q - I_1^q) + J\dot{\phi}\Omega_r + u_\theta \tag{10}$$

$$I_3^q \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(I_1^q - I_2^q)u_\psi \tag{11}$$

donde J corresponde a la inercia del motor y Ω_r a la velocidad angular residual de la hélice.

4.2.2. Modo de navegación terrestre

El modelo dinámico terrestre que se describe en esta sección es una adaptación de los modelos descritos en [5,10]. En este modelo, el vehículo se evalúa como un disco en posición vertical, por eso sólo se tiene en cuenta los ejes de coordenadas X e Y, ya que la posición en el eje Z es siempre 0.

Considerando que la velocidad en el punto de contacto de la rueda con el suelo es 0, lo cual implica que la rueda siempre gira y no se desliza, se pueden definir las restricciones de movimiento no holonómico según los ejes X e Y. Por otra parte, estas restricciones corresponden también a la cinemática del sistema. Estas restricciones se obtienen con las ecuaciones 12-13 y relacionan la velocidad del movimiento en X e Y con la velocidad angular de la rueda $\dot{\Omega}$ y la orientación del vehículo ψ:

$$\dot{x} = R\dot{\Omega}\cos(\psi) \tag{12}$$

$$\dot{y} = R\dot{\Omega}\sin(\psi) \tag{13}$$

Tal como se ha comentado anteriormente, para obtener el modelo dinámico se ha utilizado el método de energías de Lagrangre. La ecuación 14 define la energía cinética T, mientras que la ecuación 15 determina la energía potencial V del sistema.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$T = \frac{1}{2}(m_r + m_q)(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}(I_y^q + m_q d^2)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}[(I_z^r + I_x^q \sin^2(\theta) + I_z^q \cos^2(\theta)]\dot{\psi} + \frac{1}{2} I_y^r \dot{\Omega}^2 \quad (14)$$

$$V = m_r g d[1 - \cos(\theta)] \quad (15)$$

donde m_r y m_q corresponden a la masa de la rueda y la masa del cuatrirotor, d es la distancia entre el COG y el CIR, I_j^i son los momentos de inercia, que vienen definidos por i, que corresponde a la rueda o al cuatrirotor, y j, que define los ejes x_r, y_r, z_r en coordenadas robot de la plataforma.

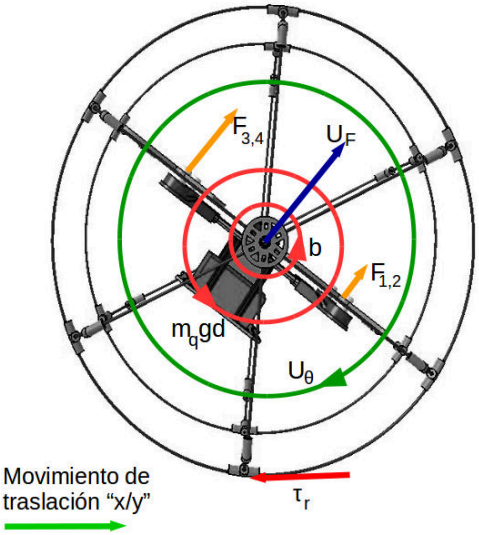


Figura 5: Fuerzas externas que afectan a la plataforma.

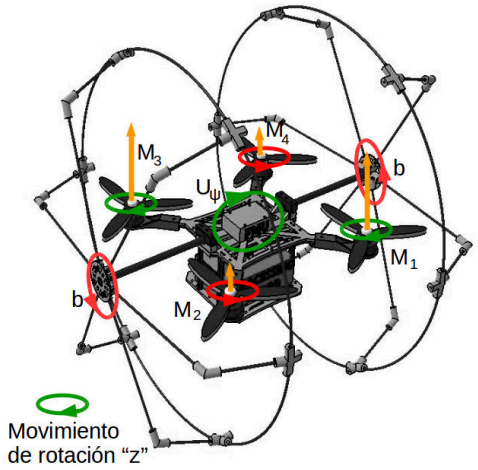


Figura 6: Momentos externos que afectan a la plataforma

La fuerzas y momentos externos que afectan a la dinámica del sistema se muestran en las ecuaciones 16-17 (ver figuras 5 y 6):

$$f_e = u_f[\sin(\theta)\cos(\psi)\hat{X} + \sin(\theta)\sin(\psi)\hat{Y}] - b\dot{\Omega} - \tau_r \quad (16)$$

$$m_e = [u_\theta - m_q g d \sin(\theta) - b\dot{\theta}]\hat{Y} + [u_\psi \cos(\theta) - b\dot{\psi}]\hat{Z} \quad (17)$$

donde b es el coeficiente de fricción de los cojinetes, los cuales permiten el giro independiente de la rueda y el cuatrirotor, y τ_r es la resistencia del suelo al movimiento giratorio de la rueda, y viene determinado por la ecuación 18:

$$\tau_r = C_{rr} R||(m_q + m_r)g - u_f cos\theta|| \quad (18)$$

donde R corresponde al radio de la rueda, y C_{rr} es el factor de dureza del suelo. En suelos de hormigón o asfalto, este valor está entre 0.01 y 0.05.

En la ecuación de Lagrange 19, q_k es la variable de estado y λ_1 y λ_2 son los multiplicadores de Lagrange que se aplican desarrollando las restricciones no holonómicas:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q_k}} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_{qk} + \lambda_1 a_{q\dot{k}} + \lambda_2 a_{q\dot{k}} \quad (19)$$

Aplicando la ecuación de Lagrange para las variables X e Y se obtienen λ_1 y λ_2, los cuales aplicándolos a la evaluación de Lagrange para las variables θ, ψ y Ω, dan lugar a las ecuaciones 20-22:

$$\ddot{\Omega} = \frac{1}{I_y^r}[u_f R \sin(\theta) - m_q g d \sin(\theta) - \tau_r - b\dot{\Omega} + (m_q + m_r)R(\ddot{x}\sin(\psi) + \ddot{y}\cos(\psi)) \quad (20)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{u_\psi \cos(\theta) - b\dot{\psi}}{I_z^r + I_x^q \sin^2(\theta) + I_z^q \cos^2(\theta)} \quad (21)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{u_\theta - m_q g d \sin(\theta) - b\dot{\theta} - 2(I_Z^Q - I_X^Q)\dot{\psi}^2}{(I_y^q + m_q d^2)} \quad (22)$$

Las ecuaciones 12-13 y 20-22 definen el modelo dinámico del sistema terrestre.

A modo de ejemplo, la figura 7 muestra simulaciones del anterior modelo dinámico para diferentes valores de sus entradas. Más concretamente, se mantiene una consigna de velocidad angular sobre los motores durante 0.5 segundos y se deja evolucionar el sistema. En particular, para provocar un movimiento de cabeceo (pitch) θ, las velocidades angulares de los motores $w_{1,2}$ y $w_{3,4}$ se mantienen a diferente valor, lo cual provoca un momento sobre y_q que, junto con el empuje U_f, da lugar a una traslación sobre el plano del suelo. Por otro lado, para provocar un giro alrededor de z_q se ha

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

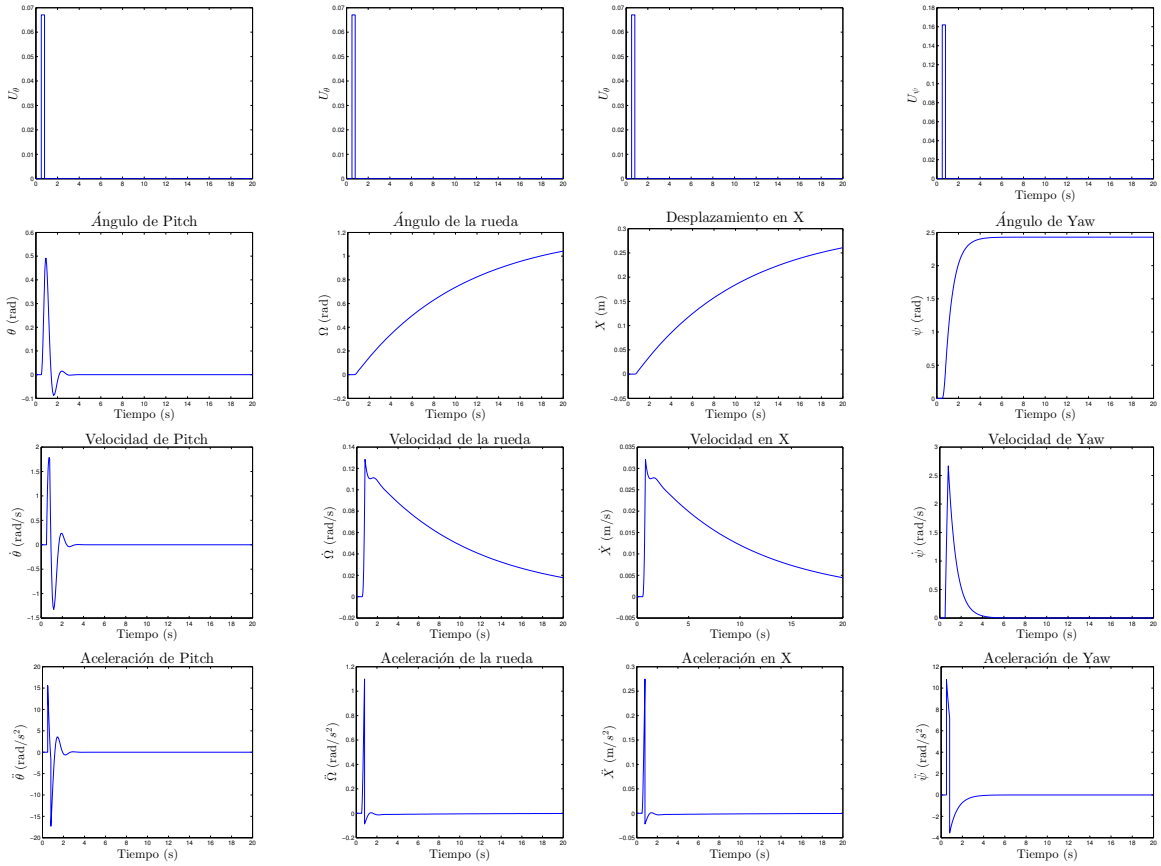


Figura 7: Gráficos ilustrativos del modelo dinámico correspondiente al modo terrestre.

de realizar un movimiento en guiñada (yaw) manteniendo las velocidades angulares $w_{1,3}$ diferentes a $w_{2,4}$.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Este artículo describe una plataforma híbrida, aérea y terrestre, diseñada para realizar tareas de inspección visual. Combinando dos plataformas en una, es posible conseguir las ventajas de un robot aéreo y de un robot terrestre. Los principales aspectos mecánicos y electrónicos de la plataforma han sido detallados, así como su modelo dinámico. Por otra parte, cabe destacar que el vehículo ha sido diseñado con una gran carga útil que permite incorporar diferentes combinaciones de sensores. Con estas características, el vehículo puede ser configurado para diferentes tareas de inspección.

Por otro lado, gracias al PC empotrado y la posibilidad de embarcar diferentes configuraciones de sensores, la plataforma híbrida tiene capacidad para ser dotada de autonomía supervisada. Esta implementará un conjunto de comportamientos que permitirán obtener un cierto nivel de autonomía, que cubrirá diferentes tipos de tareas y situaciones, alcanzando niveles de baja o media complejidad sin intervención humana. Para abarcar mayores niveles de complejidad, el modelo de autonomía supervisada introduce un operador en el lazo de control. De hecho, la idea principal no es la de cambiar de un modo de operación (total autonomía) a otro (teleoperación), sino la de implementar una estrategia global donde el humano esté siempre dentro del lazo de control, monitorizando el progreso de la tarea y pudiendo tomar el control de la plataforma en cualquier momento.

La incorporación de la autonomía supervisada pretende ayudar al operador en el guiado del robot mediante comandos intuitivos los cuales evitarán tener que controlar acciones complejas de la plataforma y centrarse en las tareas de inspección.

Agradecimientos

Este trabajo esta parcialmente financiado por el proyecto FP7 INCASS (MOVE/FP7/605200/INCASS)

Referencias

[1] M. Eich, F. Bonnin-Pascual, E. Garcia-Fidalgo, A. Ortiz, G. Bruzzone, Y. Koveos,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

and F. Kirchner, "A robot application for marine vessel inspection," *Journal of Field Robotics*, vol. 31, no. 2, pp. 319 –341, 2014.

[2] M. Burri, J. Nikolic, C. Hurzeler, G. Caprari, and R. Siegwart, "Aerial service robots for visual inspection of thermal power plant boiler systems," in *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2012 2nd International Conference on*, 2012, pp. 70–75.

[3] F. Bonnin-Pascual, E. Garcia-Fidalgo, and A. Ortiz, "Semi-autonomous visual inspection of vessels assisted by an unmanned micro aerial vehicle," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, oct. 2012, pp. 3955 –3961.

[4] A. Ortiz, F. Bonnin, A. Gibbins, P. Apostolopoulou, W. Bateman, M. Eich, F. Spadoni, M. Caccia, and L. Drikos, "First steps towards a roboticized visual inspection system for vessels," in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2010, pp. 1–6.

[5] A. Kalantari and M. Spenko, "Design and experimental validation of HyTAQ, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 4445–4450.

[6] S. Bouabdallah and R. Siegwart, "Design and control of a miniature quadrotor," in *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, ser. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, K. Valavanis, Ed. Springer Netherlands, 2007, vol. 33, pp. 171–210.

[7] M. Quigley, K. Conley, B. P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.

[8] S. Bouabdallah and R. Siegwart, "Full control of a quadrotor," in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, 2007, pp. 153–158.

[9] S. Barros dos Santos, C. Nascimento, and S. Givigi, "Design of attitude and path tracking controllers for quad-rotor robots using reinforcement learning," in *Aerospace Conference, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–16.

[10] T. Mestdag and M. Crampin, "Nonholonomic systems as restricted euler-lagrange systems," *Balkan Journal of Geometry Its Aplications*, vol. 15, no. 2, pp. 78–89, 2010.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Algoritmo para particionado automático de sistemas con criticidad mixta

Emilio Salazar[1], Alejandro Alonso[1] and Salvador Trujillo[2]

[1]Universidad Politécnica de Madrid
{esalazar,aalonso}@dit.upm.es
[2]IKERLAN
strujillo@ikerlan.es

Resumen

El desarrollo de sistemas particionados en plataformas multicore presenta nuevos desafíos que están siendo objeto de muchas investigaciones. En esta clase de desarrollos existe un trabajo adicional: identificar las aplicaciones que deben ser ejecutadas en la misma partición. Para lograr este objetivo se deben tener en cuenta un número importante de consideraciones, tales como el nivel de criticidad, requisitos temporales, requisitos de seguridad (*safety* y *security*), requisitos de hardware, etc.

Este artículo describe en detalle el algoritmo de generación automática de particiones desarrollado en el marco del proyecto MultiPARTES [10].

Palabras clave: Real-time systems, Partitioned Systems, Mixed Criticality, Model Driven Engineering.

1 Introducción

Los progresos tecnológicos en el campo de los procesadores han incrementado notablemente su potencia de cálculo. Los complejos sistemas críticos empotrados que antaño debían ejecutarse en múltiples equipos, ahora se pueden ejecutar sin problemas en un único computador con múltiples núcleos, con tiempo de computo disponible para ejecutar otras aplicaciones no críticos.

No obstante, aunque la posibilidad de ejecutar múltiples sistemas en un único computador tiene muchas ventajas, existe todavía una dificultad muy importante: garantizar espacial y temporalmente la correcta ejecución de todos los sistemas, incluso en caso de fallo de alguno de ellos.

Una aproximación que cada vez cobra más fuerza es el uso de sistemas particionados. En un sistema particionado se añade un software de muy bajo nivel entre el hardware y el resto aplicaciones denominado hipervisor. Los hipervisores como Xtratum [17] [9] permiten la creación de particiones. Las particiones deben estar completamente aisladas unas de otras, para que el fallo de una no afecte al correcto funcionamiento de las demás. Dentro de cada partición, se pueden ejecutar aplicaciones de diferente criticidad de forma segura, ya que Xtratum garantiza la separación espacial y temporal exigida en el estándar ARINC-653 [3].

Sin embargo, el soporte para el diseño y construcción de sistemas particionados multicore es todavía escaso. El proyecto MultiPARTES [10] nace con el objetivo de mejorar ese soporte. MultiPARTES busca crear un entorno de desarrollo de sistemas críticos particionados en plataformas multicore libre y abierto, con herramientas de apoyo de desarrollo basado en MDE (*Model Driven Engineering*) [19].

En este artículo se presenta parte de las herramientas que se están desarrollando en el marco del proyecto MultiPARTES cuyo principal propósito es facilitar el desarrollo de sistemas particionados críticos y de alta integridad en plataformas multicore [18] [2]. En particular, se muestra el algoritmo que permite la generación automática de las particiones a partir de los modelos de entrada.

2 Arquitectura del sistema

En la figura 1 se muestra una descripción de los principales componentes de la arquitectura del sistema, que se pueden resumir en:

Modelado del sistema: Se trata de la principal entrada a la herramienta. Se compone, fundamentalmente, de tres modelos:

- Modelo de plataforma. Contiene la información relacionada con la plataforma de ejecución: hardware subyacente, hipervisor y sistemas operativos disponibles.
- Modelo de aplicación. Describe la aplicación. Se han definido dos tipos principales de modelos de aplicación:
  - *Modelo de aplicaciones modeladas con UML 2 [15] y el perfil MARTE [14].* Gracias al detalle con el que se puede modelar la aplicación al emplear UML-MARTE, es posible realizar:

Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia
ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

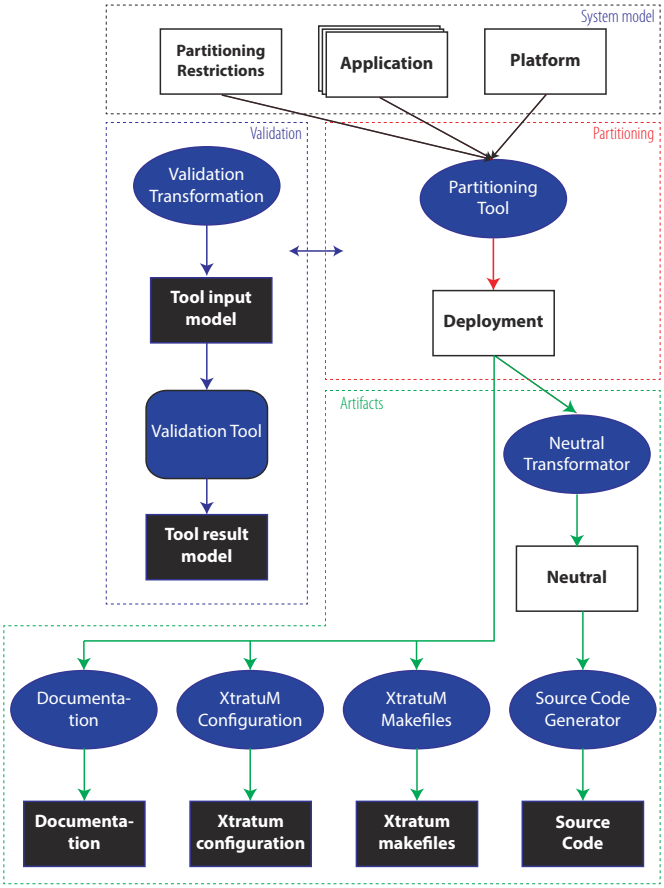


Figura 1: Arquitectura general de las herramientas

  - ∗ El perfil de MARTE provee de estereotipos donde se definen las propiedades temporales de cada objeto del sistema (p.e. periodos de tareas, tiempos de respuesta, etc.).
  - ∗ Otra característica importante que permite el modelo UML-MARTE es que proporciona la base para generar esqueletos de código Ada 2005 [7] acorde al perfil de Ravenscar [4], lo que se requiere para sistemas críticos.
  - – *Modelo de aplicaciones pre-existentes.* Para cumplir con este requisito, se ha ideado un modelo que permite definir la información mínima necesaria de cada aplicación para poder realizar un particionado válido.

- Modelo de restricciones al particionado. Describe explícitamente restricciones que debe cumplir el particionado resultante. Este modelo se explica con mayor detalle en la sección 3.

Herramienta de particionado del sistema: Genera automáticamente las particiones del sistema, que es el objeto de este artículo y se explica detalladamente en la sección 3.

Validación: Integrar en la herramienta todos los procesos de validación es muy complejo y además haría muy complicado ampliar la herramienta con procesos de validación de nuevas propiedades no funcionales. Por ello, se ha optado por ofrecer un modelo de interfaz (modelo de despliegue) con otras herramientas y dejar que éstas se encarguen de la validación.

Generación de artefactos: una vez que se ha comprobado que el particionado propuesto cumple con los requisitos requeridos se generan una serie de artefactos cuya misión es ayudar al diseñador a construir el sistema final:

- Ficheros de configuración de Xtratum.
- Scripts de compilación del sistema.
- Esqueletos de código (Ada 2005 con el perfil de Ravenscar).

Esta herramienta está todavía en desarrollo. En el momento de escribir estas líneas hay un prototipo de la herramienta capaz de trabajar con

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

modelos sencillos. No obstante, el objetivo es ir añadiendo funcionalidades gradualmente hasta obtener una herramienta completamente funcional. La plataforma de desarrollo es Eclipse Modeling Tools y emplea Java como principal lenguaje de programación. Los metamodelos empleados son ECore o UML 2.4.

3 Particionado del sistema

En esta sección de describe con detalle cómo funciona el algoritmo de particionado de la herramienta. El problema a resolver es cómo agrupar las aplicaciones descritas en las entradas en el menor número posible de particiones de modo que se cumplan todos los requisitos especificados por el diseñador, usando de la forma más equilibrada posible todos los recursos hardware de la plataforma.

Debido a la magnitud del problema, se ha optado por seguir la estrategia "divide y vencerás". Esta estrategia consiste en dividir el problema original en sub-problemas más pequeños cuya resolución sea más asequible.

En el caso que nos ocupa se han identificado los siguientes sub-problemas:

- Agrupar las aplicaciones en particiones cumpliendo con los requisitos definidos en los modelos de entrada. Se puede tratar como un problema de asignación de elementos a recursos.
- Asignar las particiones a los recursos de procesamiento disponibles en la plataforma de la forma más equilibrada posible. Se puede tratar como un problema de equilibrado de cargas de trabajo.
- Generación de un plan de ejecución de las particiones generadas que permita cumplir los requisitos temporales de todas las aplicaciones contenidas en las particiones.

Dada la complejidad de cada uno de los problemas, se ha decido abordarlos en secuencia. Este articulo se centrará en el algoritmo empleado para resolver el primero de los sub-problemas: la generación de las particiones.

3.1 Entradas

La información de entrada que requiere el algoritmo de generación de particiones es:

3.1.1 Aplicaciones

Las aplicaciones que deben ser agrupadas en particiones. Esta información se obtiene de los modelos de aplicación definidos por el diseñador en la entrada.

3.1.2 Restricciones

Una restricción al particionado consiste en una regla que indica al algoritmo de particionado lo que debe (o no) hacer con una determinada aplicación. En el algoritmo actual existen las siguientes reglas:

1. La aplicación A no puede ir en la misma partición que la lista de aplicaciones Va.
2. La aplicación A debe ir en la misma partición que la lista de aplicaciones Va.
3. La aplicación A debe ser alojada en la partición P.
4. La aplicación A no debe ser alojada en la partición P.
5. La aplicación A requiere acceso al hardware H.
6. La aplicación A es una aplicación que viene ya empaquetada en una partición y no debe modificarse.

Se han identificado dos clases de restricciones dependiendo de si éstas pueden ser automáticamente deducidas o no:

- Restricciones implícitas. Son aquellas restricciones que son necesarias para que se verifiquen restricciones intrínsicas de un sistema particionado con criticidades mixtas.

  Por ejemplo, dos aplicaciones con diferente sistema operativo nunca podrán ir en la misma partición, pues cada partición alberga un único sistema operativo. Otro ejemplo es el hardware exigido por cada aplicación: una aplicación para procesadores Intel, no puede ir en la misma partición que otra aplicación que está compilada para procesadores SPARC.

  Del mismo modo, dos aplicaciones con diferente nivel de criticidad no pueden ir en la misma partición, ya que cada partición sólo ejecuta aplicaciones que posean el mismo nivel de criticidad. Una buena parte de esta clase de restricciones son detectadas por la herramienta y generadas automáticamente ahorrando al diseñador indicarlas explícitamente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Restricciones explícitas. Son restricciones adicionales que se deben cumplir para que el particionado sea válido y que el diseñador indica de forma expresa. A diferencia de las anteriores, esta clase de restricciones no pueden ser deducidas automáticamente por la herramienta pues normalmente responden requisitos no modelados en MARTE o a necesidades particulares de un sistema concreto.

  Una ventaja significativa de poder definir restricciones de particionado de forma explicita es la posibilidad de integrar en el algoritmo de particionado el conocimiento de otras herramientas especializadas en diferentes campos. Así por ejemplo, una herramienta de análisis de criticidad puede generar la lista de restricciones oportuna para que el sistema particionado cumpla con el estándar de correspondiente (p.e. el servidor de vídeo y el servidor de juegos de un sistema de entretenimiento de un avión no pueden ir en la misma partición).

3.2 Algoritmo

El objetivo del algoritmo es encontrar un conjunto mínimo de particiones que albergue a todas las aplicaciones y cumpla con todas las restricciones. Como ya se dijo anteriormente, se trata de un problema de asignación de elementos a recursos.

Tras realizar un análisis de los posibles algoritmos a emplear, se decidió adaptar el algoritmo Iterated Register Coalescing (IRC) [6].

3.2.1 Iterated Register Coalescing (IRC)

IRC es un algoritmo heurístico que mantiene una complejidad de implementación aceptable a la vez que proporciona unos resultados de buena calidad. IRC fue originalmente diseñado para ser empleado en el generador de código de los compiladores. Su objetivo era asignar las variables temporales del código intermedio a los registros hardware del procesador. Se pueden observar muchas similitudes entre el problema de asignar variables a registros y el de asignar aplicaciones a particiones:

- Asignar un conjunto de elementos a un conjunto mas pequeño de recursos. En IRC se asignan variables temporales a registros máquina. En nuestro caso, se asignan aplicaciones a particiones.

- Emplear el menor número posible de recursos. Cuantos menos registros emplee el compilador, mejor ya que el número de copias de un registro a otro se reduce, y por tanto, se incrementa la velocidad de ejecución. Del mismo modo, cuantas menos particiones haya en el sistema, menos cambios de contexto entre particiones, y por tanto, mayor será la eficiencia del sistema.

- Elementos con recursos predeterminados. Por ejemplo, en la mayor parte de las arquitecturas hardware, las operaciones de coma flotante usan unos registros especialmente optimizados para ellas. Por ello, el compilador debe asignar las variables temporales implicadas en operaciones de coma flotante a dichos registros. En el caso del particionado, una de las restricciones que se pueden dar es que una aplicación debe ir en una partición determinada a priori.

- Elementos que comparten recursos. El código intermedio se puede optimizar si se detectan dos variables temporales que no están activas al mismo tiempo. En estos casos, se puede asignar a ambas variables el mismo registro máquina sin interferencias. La misma idea se puede aplicar al tratar las restricciones que fuerzan al algoritmo a colocar un conjunto dado de aplicaciones en la misma partición.

No obstante, existen también algunas diferencias que impiden la aplicación inmediata del IRC al problema del particionado:

- Conjunto de recursos finito. El número de registros disponibles en un procesador es limitado. El número de particiones que se pueden crear es infinito, aunque se trata de mantener en todo momento el menor número de particiones posible.

- Solución única. IRC está diseñado para ofrecer una única solución. El algoritmo de particionado debe ser capaz de generar múltiples soluciones factibles porque es posible que el particionado propuesto en un primer momento sea rechazado por algún análisis posterior.

- Soluciones ordenadas. Como se ha dicho en el punto anterior, es necesario poder generar múltiples esquemas de particionado. No obstante, se debe ofrecer en cada momento el mejor resultado posible de aquellos que se han encontrado.

3.2.2 Representación del problema: Grafos coloreados

La herramienta matemática en la que se basa IRC es la teoría de grafos. Un grafo es un conjunto de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

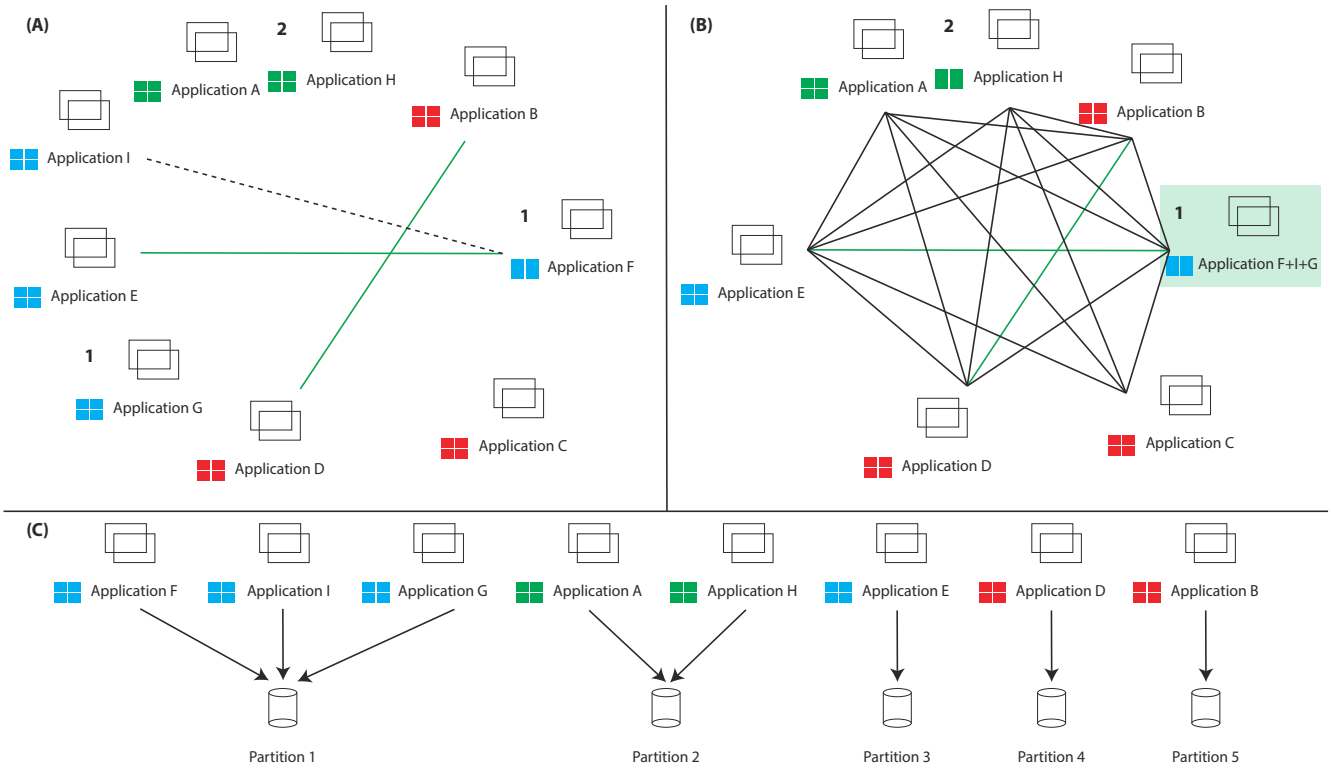


Figura 2: (A) Grafo inicial. (B) Grafo con las restricciones implícitas aplicadas (C) Esquema de particionado propuesto

objetos llamados vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos, que permiten representar relaciones binarias entre elementos de un conjunto. En particular, IRC emplea un caso especial de etiquetado de grafos, llamado coloración de vértices, donde se asignan etiquetas (o colores) a los vértices del grafo. Dicha asignación de colores ha de ser tal que ningún vértice adyacente comparta el mismo color.

El número mínimo de colores que se pueden emplear para colorear los vértices de un grafo se denomina número cromático y es un conocido problema NP-Completo [5], en otras palabras, hasta el momento, no se conocen algoritmos que resuelvan este problema en su caso general en tiempo polinómico. La aproximación que se suele llevar a cabo en esta clase de problemas es la utilización de algoritmos heurísticos (como IRC). Esta clase de algoritmos no buscan la solución óptima, sino que se conforman con encontrar soluciones aceptables.

La representación del problema de particionado en un grafo coloreado sería la siguiente:

- Los vértices representan una o más aplicaciones.
- Los colores asignados a cada vértice representan las particiones donde debe ser ejecutada la aplicación.
- Las aristas entre vértices representa restricciones de tipo 1. Es decir, unen aplicaciones que no pueden ser ejecutadas en la misma partición.

Con esta representación, el número cromático del grafo coincide con el mínimo número de particiones necesarias para albergar todas las aplicaciones.

3.2.3 Grafo inicial

A continuación se muestra cómo funciona el algoritmo de generación de particiones con un ejemplo. Por claridad se ha simplificado las restricciones implícitas y los datos que se tienen en cuenta para generarlas así como la información asociada a cada vértice. En la figura 2A se muestra el grafo inicial donde se representa la información que se ha recibido de las entradas:

- Un conjunto de aplicaciones. Cada aplicación indica el sistema operativo donde debe ejecutar, representado en el dibujo por el color de la bandera.
- Un conjunto restricciones explicitas:

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Las líneas continuas indican restricciones de tipo 1, es decir, unen aquellas aplicaciones que no deben nunca ejecutar en la misma partición.
- Las líneas discontinuas representan restricciones del tipo 2, es decir, unen aplicaciones que deben ejecutar siempre en la misma partición.
- Los números en negrita a la izquierda de cada aplicación indican que dicha aplicación debe ser alojada en la partición indicada.

3.2.4 Restricciones implícitas

El primer paso del algoritmo es generar las restricciones implícitas. Las restricciones implícitas se generan automáticamente (como se explica en la sección 3.1.2). Pueden ser de cualquier tipo, aunque las que afectan al algoritmo del coloración de vértices son las de tipo 1 y 2.

En este ejemplo son las siguientes:

- Aplicaciones con diferente sistema operativo deben ejecutar en particiones diferentes. Por tanto, todas las aplicaciones con diferente sistema operativo tienen que estar relacionadas con una restricción de tipo 1.
- Las aplicaciones que tienen predefinida la misma partición deben ir en la misma partición. Por tanto, las aplicaciones F y G deben estar unidas por una restricción de tipo 2.

Una vez generadas las restricciones implícitas, el grafo de la figura 2A se convierte en el mostrado en la figura 2B.

Es importante resaltar que el algoritmo de coloración de grafos trabaja únicamente con las restricciones de tipo 1. Las restricciones de tipo 2 que en la figura 2A se muestran como líneas discontinuas, en realidad no indican adyacencia entre dos vértices, sino que se emplean para indicar al algoritmo qué vértices pueden simplificarse y cuales no (ver sección 3.2.5).

3.2.5 Transitividad de restricciones de tipo 2

El segundo paso del algoritmo es la unión de los vértices unidos por restricciones de tipo 2 aprovechando la transitividad de estas restricciones.

Los vértices que están relacionados con una restricción de tipo 2 se deben colorear con los mismos colores. Por otra parte, la restricción de tipo 2 implica heredar las restricciones de tipo 1 del otro vértice de la relación. De modo que dos vértices unidos por restricciones de tipo 2 tienen prohibido el conjunto de colores que están en uso por parte de aquellos vértices con los que cualquiera de los dos vértices esté relacionados a través de una restricción de tipo 1.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se puede concluir que dos vértices relacionados con una restricción de tipo 2 se comportan como si fueran un único vértice:

- cuyas restricciones de tipo 1 son la unión de las restricciones de los dos vértices originales
- cuyos colores pre-asignados son la unión de los colores pre-asignados de los vértices originales.

En el grafo de la figura 2 los vértices F e I están relacionados por una restricción 2 explícitamente dada por el diseñador. Por otra parte, los vértices F y G están relacionados con una restricción 2 automáticamente generada en el paso anterior.

Aplicando lo anteriormente dicho, se puede crear un único vértice unión que representa a los vértices F, G e I juntos y que hereda sus restricciones de tipo 1 así como los colores que estos tuvieran pre-asignados. A continuación se pueden eliminar los vértices F, G e I del grafo.

En este paso se deben simplificar todas las restricciones de tipo 2, pues en los pasos posteriores sólo pueden existir restricciones de tipo 1. Tras aplicar este paso al grafo inicial, el resultado es el que se muestra en la figura 2B.

3.2.6 Reducción del grafo

El tercer paso del algoritmo es la reducción del grafo de los vértices que no están pre-asignados a un color. Los vértices pre-asignados (vértices H y F+I+G en el ejemplo) permancerán todo el rato en el grafo. El proceso consiste en extraer del grafo el vértice de menor grado (número de aristas), apilarlo en una pila auxiliar y eliminar sus aristas del grafo. Repetir el proceso hasta que no queden más vértices, o bien, todos los vértices que queden en el grafo estén pre-asignados.

3.2.7 Coloración de los vértices

El cuarto paso es la coloración de los vértices. Para ello, se extraen los vértices de la pila, de uno en uno, y en orden inverso a cómo fueron insertados (LIFO). A cada vértice extraído se le asigna un color teniendo en cuenta que no puede coincidir con ninguno de los colores que usen los vértices adyacentes ya extraídos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

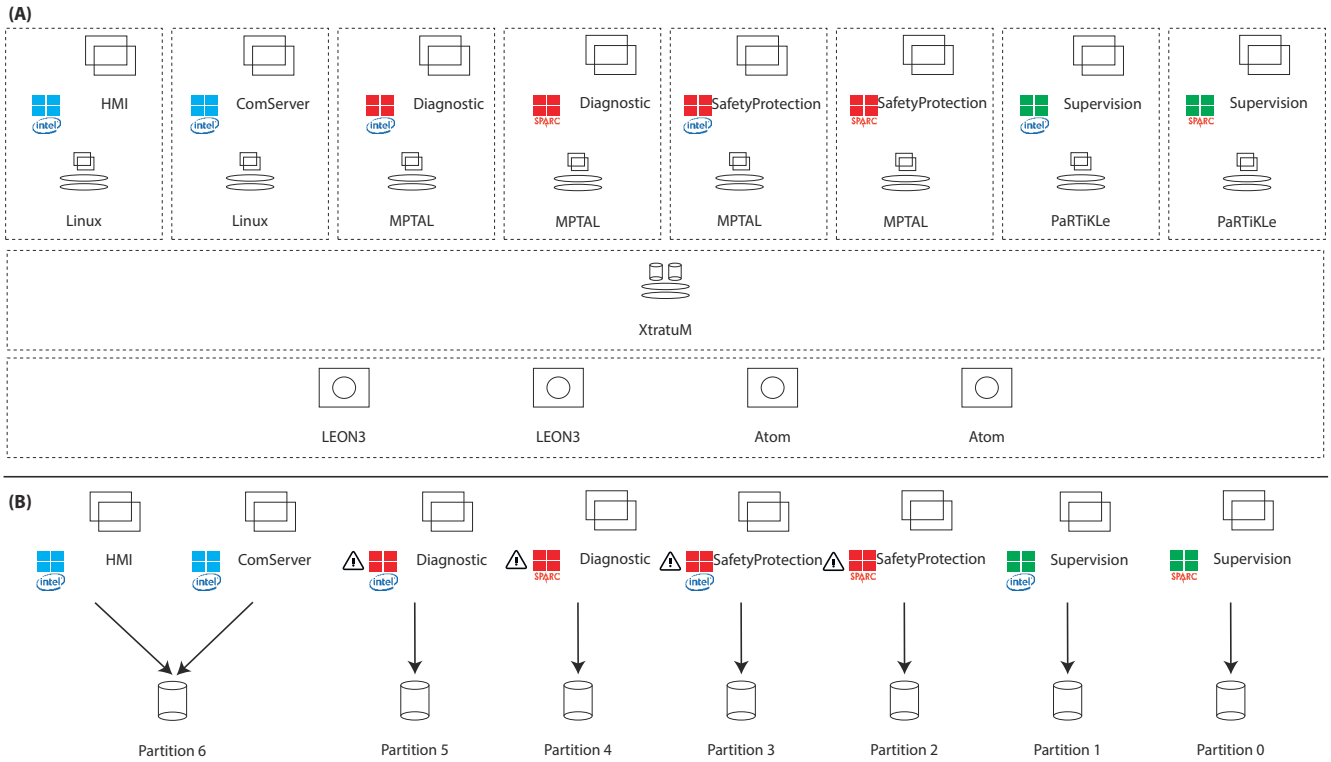


Figura 3: (A) Arquitectura del sistema de control Galileo (B) Esquema de particionado propuesto por la herramienta

También hay que tener en cuenta que es posible que un vértice puede ser coloreado con más de un color. Para estos casos, se ha definido una función de afinidad. La misión de esta función es ordenar, de mayor a menor, la afinidad del vértice por el color. Cuanto mayor sea la afinidad del color, antes será empleado para colorear el vértice. Los criterios de afinidad no están todavía completamente estudiados y probablemente cambien según avance el desarrollo. De momento, se emplean los siguientes criterios:

- Periodos similares. Se prefiere aquella partición que contenga aplicaciones con periodos de un rango similar al de la nueva aplicación.
- Tiempo de cómputo. Se prefiere aquella partición que tenga un menor tiempo de computo global.

De modo que cuando se encuentra un vértice con múltiples colores candidatos, estos se ordenan en función de su afinidad al vértice. A continuación se guarda el estado del grafo, ya que será a partir de este punto de dónde comenzará la búsqueda de soluciones alternativas (ver sección 3.2.9). Finalmente se selecciona el color más afín y se continúa con el proceso.

El estado del grafo se almacena únicamente en el primer caso de vértice con múltiples colores candidatos. El motivo es que todos los vértices con múltiples colores candidatos que se hallen a continuación pueden cambiar de candidatos o de dejar de ser vértices multicolor después de modificar el color del primer vértice multicolor encontrado.

3.2.8 Generación de soluciones

Teniendo en cuenta que los vértices representan a una o más aplicaciones, y que los colores representan las particiones, el esquema de particionado correspondería con el mostrado en la figura 2C.

3.2.9 Generación de soluciones alternativas

Como ya se ha mencionado previamente, el esquema de particionado propuesto puede ser rechazado en la etapa de validación. Por este motivo, es preciso que el algoritmo de particionado sea capaz de proporcionar más de una solución aceptable.

Para generar una solución alternativa, se restaura el estado del grafo. Es decir, se vuelve a tener el grafo y la pila auxiliar en el mismo estado que se tenía cuando se encontró el primer vértice múltiplicolor. Por tanto, el primer vértice a ser coloreado de nuevo es el primer vértice múltiplicolor

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

que se encontró.

La diferencia en esta ocasión es que, en vez de seleccionar el color más afín (el que se usó en la solución anterior), se emplea el segundo color más afin y se deshecha el primero. Si el vértice sigue siendo multicolor se guarda el estado del nuevo grafo. Si no, se elimina el estado guardado y se procede a colorear el resto de vértices que queden en la pila tal y como se describe en la sección 3.2.7.

4 Caso de estudio: Galileo wind turbine control

Galileo [20] el sistema de control distribuido empleado por Alstom Renewables en sus aerogeneradores. Se trata de un sistema de criticidades mixtas, pues deben ejecutar componentes con requisitos de safety a la vez que otros componentes no-safety. Además, algunos de los componentes tienen restricciones de tiempo real, mientras que otros no. Galileo, es por tanto, un claro de ejemplo de un complejo sistema de control con elementos de diversa criticidad y requisitos.

En la figura 3 se muestra el particionado realizado a mano por los ingenieros. El objetivo es modelar Galileo con la herramienta de particionado automático de modo que el resultado coincida con el que los ingenieros han sugerido como idóneo.

4.1 Plataforma

En la figura 3 se muestra la arquitectura general de Galileo. La plataforma hardware es un entorno heterogéneo compuesto por procesadores de arquitecturas Intel y SPARC. En particular, es un sistema multiprocesador multicore con 2 procesadores de doble núcleo Intel Atom y dos procesadores de tres núcleos LEON3 [1]. La conexión lógica entre los núcleos se realiza mediante TTNoC [13].

Las aplicaciones que deben ejecutar sobre esta plataforma hardware tienen diferentes diferentes niveles de criticidad, diferentes requisitos temporales y diferentes sistemas operativos. Por ello, se ha optado por implementar un sistema particionado empleando el hipervisor Xtratum. Los sistemas operativos que se emplean son: PaRTIKLe (para Intel y SPARC), MPTAL (para Intel y SPARC) y Linux (sólo para Intel).

4.2 Aplicaciones

En este caso de estudio intervienen 5 aplicaciones, a saber:

- COM_Server: Se encarga de interactuar con sensores y actuadores conectados a una red EtherCAT y distribuir la información recolectada a *HMI*, *Supervision* y *Safety_Protection*. Esta aplicación, que no tiene requisitos especiales de safety ni de tiempo real, debe ejecutar bajo un sistema operativo Linux para arquitectura Intel x86.

- HMI: Esta aplicación se encarga de presentar información al operador. Requiere ejecutar bajo Linux x86. No tiene requisitos especiales ni de safety ni de tiempo real.

- Supervision: Contiene el algoritmo control y supervision en tiempo tiempo real de las turbinas. No tiene requisitos de safety pero sí de tiempo real. Además, hay una instancia de esta aplicación para cada arquitectura, es decir, debe ejecutar en un procesador LEON y en un procesador Atom. En ambos casos ejecuta bajo PaRTIKLe.

- Safety_Protection: Controla que los parámetros de la turbina permanecen en niveles aceptables. Se trata de una aplicación con requisitos de safety. Por otra parte, al igual que *Supervision*, debe ejecutar una instancia en LEON y otra en Atom. En ambos emplea MPTAL [1].

- Diagnostic. Es una aplicación con requisitos de safety que se encarga, entre otras cosas, de controlar dos temporizadores de guarda. Debe existir una instancia de esta aplicación en un procesador LEON y otra en uno Intel. Se trata de una aplicación que ejecuta en máquina desnuda con MPTAL en ambas arquitecturas.

Aquellas aplicaciones que deben estar en dos arquitecturas diferentes se consideran aplicaciones diferentes. Así por ejemplo, la aplicación *SafetyProtection* se modela como las aplicaciones *SafetyProtection (Intel)* y *SafetyProtection (SPARC)*.

4.3 Restricciones

Se debe indicar a la herramienta aquellos casos en los que una aplicación requiere un familia de procesadores en particular. De modo que las restricciones que habría que añadir son las siguientes:

[1] MPTAL (MultiPARTES Abstraction Layer) ofrece servicios ARINC 653 P4 a través de una API cuyo objetivo es estandarizar el uso de sistemas particionados en el proyecto MultiPARTES. Puede ejecutar en máquina desnuda o con la ayuda de un sistema operativo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

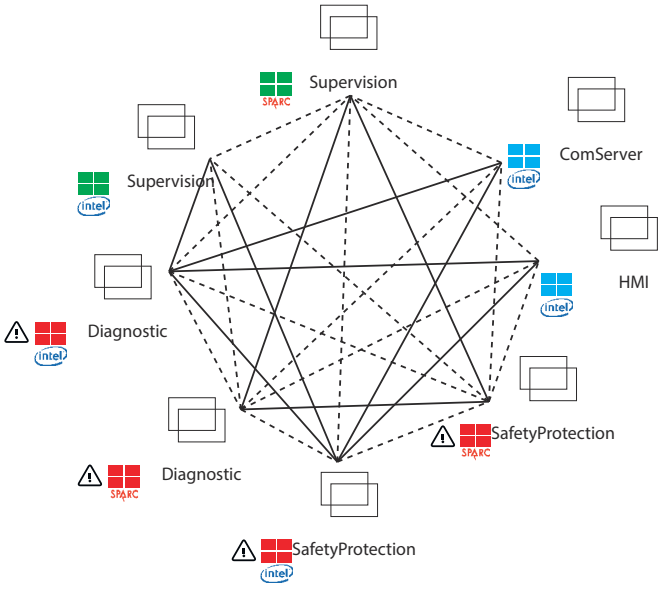


Figura 4: Grafo inicial con las restricciones implícitas generadas para el ejemplo de Galileo

- Aplicaciones que requieren ejecutar en procesadores de la familia Intel: *Supervisión (Intel)*, *Diagnostic (Intel)*, *SafetyProtection (Intel)*, *HMI* y *ComServer*.
- Aplicaciones que requieren ejecutar en procesadores de la familia SPARC: *Supervisión (SPARC)*, *Diagnostic (SPARC)*, *SafetyProtection (SPARC)*.

4.4 Grafo inicial y restricciones implícitas

Una vez definidas las entradas, se ejecuta el algoritmo mostrado en el apartado 3. La figura 4 muestra cómo sería el grafo después de haber generado el grafo inicial (sección 3.2.3) y haber añadido las restricciones implícitas (sección 3.2.4).

Las líneas discontinuas muestran las restricciones de tipo 1 insertadas automáticamente debido a la familia de procesadores. Aquellas aplicaciones que deben ejecutar en LEON3 no pueden ser alojadas en particiones que contienen aplicaciones para Atom y viceversa.

Las líneas continuas muestran las restricciones de tipo 1 insertadas automáticamente debido la criticidad. Dos aplicaciones con diferente nivel de criticidad no pueden ser alojadas en la misma partición. En la figura 3 se muestra un icono de exclamación en aquellas aplicaciones que tienen diferentes niveles de criticidad. Se puede observar que cada una de estas aplicaciones tienen prohibido ir junto a cualquier otra aplicación.

Hay que tener en cuenta que, por ejemplo, *Diagnotic* (para Intel) y *SafetyProtection* (para SPARC) no pueden ejecutarse en la misma partición por dos motivos: diferente arquitectura y diferente nivel de criticidad. No obstante, si aparece una restricción que une dos aplicaciones que ya estaban previamente unidas por una restricción del mismo tipo, esta no se repite.

4.5 Generación del particionado deseado

Una vez que se acaba de ejecutar todo el algoritmo mostrado en la apartado 3, el resultado es el siguiente el indicado en la figura 3. Como se puede comprobar, la única diferencia con el propuesto inicialmente por los ingenieros es que las aplicaciones *HMI* y *ComServer* se han colocado en la misma partición.

El motivo de esta diferencia es que no hay ningún dato en los modelos de entrada que permita deducir que estas aplicaciones deben ir separadas. Por tanto, el algoritmo busca la solución con el menor número posible de particiones.

No obstante, en caso de que se requiera que estas dos aplicaciones ejecuten en particiones separadas, basta con añadir una restricción de tipo 1 relacionando ambas. Una vez hecho esto, si se vuelve a ejecutar el algoritmo, el particionado propuesto será idéntico al mostrado en la figura 3.

5 Conclusiones

En este artículo se ha descrito el algoritmo empleado en la generación automática de esquemas de particionado con restricciones implícitas y explícitas a partir de la información proporcionada por los diferentes modelos de entrada. Ac-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tualmente, este algoritmo se está probando y validando en tres casos de uso diferentes: sistema de control de turbinas eólicas, sistema de control de abordo del satélite UPMSAT2 y en sistemas de vídeo-vigilancia.

Como se dijo en la sección 3, la generación de esquemas de particionado es sólo uno de los tres subproblemas principales a ser resueltos. Como trabajo futuro se incluye profundizar y mejorar los algoritmos de planificación y balanceo de carga de proceso del prototipo actual.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado parcialmente por fondos del proyecto FP7 STREP MultiPARTES, no. 287702 (www.multipartes.eu). Los autores agradecen al consorcio de MultiPARTES su ayuda y colaboración. Este trabajo ha sido también parcialmente financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del proyecto HI-PARTES (High Integrity Partitioned embedded systems), TIN2011- 28567-C03-01 del Plan Nacional de I+D+i.

Referencias

[1] Aeroflex Gaisler. LEON3-FT SPARC V8 Processor Datasheet and User's Manual, Aeroflex Gaisler Technical Report, 2013.

[2] Alonso, A., Salazar, E., de Miguel, M.A., A Toolset for the Development of Mixed-Criticality Partitioned Systems, in 2nd Workshop on High-performance and Real-time Embedded Systems, 2014, Vienna, Austria

[3] ARINC: Avionics Application Software Standard Interface ARINC Specification 653-1 (October 2003)

[4] Burns A., Dobbing B. and Vardanega T.: Guide for the use of the Ada Ravenscar profile in high integrity systems. Ada Letters XXIV, 1–74 (June 2004)

[5] Garey and Johnson, Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. 1979. ISBN: 0-7167-1044-7.

[6] George L., Appel A.W.: Iterated register coalescing. TOPLAS 18(3), 300–324 (1996).

[7] ISO/IEC: ISO/IEC 8652:1995(E) / TC1(2000)/AMD1(2007): Information Technology - Programming Languages - Ada (2007)

[8] González Harbour M., Gutiérrez J.J., Palencia J.C., Drake, J.M.: "MAST modeling and analysis suite for real time applications". In: Proceedings of 13th Euromicro Conference on Real-Time Systems,(June 2001).

[9] Masmano M., Ripoll I., Crespo A., Peiro S.: XtratuM for LEON3: an OpenSource Hypervisor for High-Integrity Systems. Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2 2010), May 2010.

[10] MultiPARTES: Multi-cores Partitioning for Trusted Embedded Systems, Available: www.multipartes.eu

[11] MultiPARTES project, "Requirements Platform and Methodology Viewpoint", Deliverable D2.2, http://www.multipartes.eu.

[12] MultiPARTES project, "Specification and Models of Platform", Deliverable D5.1, http://www.multipartes.eu.

[13] Obermaisser, R.: Time-triggered communication. CRC Press, Inc., 2011 ISBN 9781439846612.

[14] OMG: Modeling and Analysis of Real-Time Embedded Systems (2011), http://www.omg.org/spec/MARTE/, version 1.1

[15] OMG: Unified Modeling Language (UML) (2011), http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/, version 2.4.1

[16] Panunzio, Marco, and Tullio Vardanega. "Ada Ravenscar code archetypes for component-based development." Reliable Software Technologies–Ada-Europe 2012. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 1-17.

[17] Peiro S., Masmano M., Ripoll I. and Crespo A. "PaRTiKle OS, a replacement of the core of RTLinux", in Proc. of the Real-Time Linux Workshop, 2007.

[18] Salazar E., Alonso A., de Miguel M.A., de la Puente, J.A. "A Model-Based Framework for Developing Real-Time Safety Ada Systems". In H.B. Keller, et al (eds.), Reliable Software Technologies — Ada-Europe, LNCS 7896, pp. 126–141. Springer-Verlag, 2013.

[19] Schmidt, Douglas C. "Guest editor's introduction: Model-driven engineering." Computer 39.2 (2006): 0025-31.

[20] Trujillo, Salvador, Alfons Crespo, and Alejandro Alonso. "MultiPARTES: Multicore virtualization for Mixed-criticality Systems." Digital System Design (DSD), 2013 Euromicro Conference on. IEEE, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ENFOQUE ESTRATÉGICO PARA EL PROBLEMA PEG-IN-HOLE UTILIZANDO PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS

Fares J. Abu-Dakka
Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, fabudakk@ing.uc3m.es

Mohamed Abderrahim
Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, mohamed@ing.uc3m.es

Resumen

En este trabajo se propone un algoritmo para evaluar la aplicación de Primitivas de Movimientos Dinámicos (DMP) en la solución de tareas de montaje como la aplicación de insertar un objeto en un agujero (Peg in Hole: PiH). Las DMPs pueden codificar las políticas de control de movimientos discretos de punto a punto, y permiten la modulación de diferentes propiedades de las trayectorias codificadas. En este contexto, las DMPs necesitan ser combinadas con el control de retroalimentación de fuerza/par. Se propone un esquema que combina un control híbrido, posición y fuerza, con las DMPs para el comportamiento de búsqueda del agujero y la tarea de inserción. Se ha desarrollado una estrategia completa para llevar a cabo una inserción exitosa. El enfoque propuesto se ha evaluado experimentalmente con el brazo robótico de Kuka LWR realizando la inserción de objetos redondos y cuadrados.

Palabras clave: Peg-In-Hole, sistemas dinámicos no-lineales, aprendizaje robótico.

1 INTRODUCCIÓN

La inserción de un objeto en un agujero, siendo un problema de montaje clásico, ha sido ampliamente investigada con diferentes perspectivas y objetivos. Se trata de manipulaciones que incluyen un contacto con el entorno. Así PiH requiere tanto un control de posición y de fuerza como un control preciso. Una posible solución consiste en equipar el elemento terminal del robot con un dispositivo mecánico pasivo compuesto de muelles y amortiguadores.

El objetivo de este trabajo es planificar el movimiento del robot durante las fases de aproximación, búsqueda, e inserción de la tarea PiH utilizando las DMPs. Como se detalla en [1], las inserciones de PiH se pueden facilitar con la introducción apropiada de rigidez lateral y rotacional bajas en el mecanismo de agarre. Un dispositivo mecánico pasivo conocido como el RCC (Centro remoto de compliance) se basa en este principio. En términos más técnicos, el RCC permite colocar el centro de compliance en la punta del objeto en el elemento terminal. El centro de compliance es un punto tal que una fuerza aplicada a ese punto provoca una traslación pura mientras que un par de torsión aplicado en ese punto provoca una rotación pura alrededor del mismo.

La inserción y la exacta alineación del objeto con el agujero han sido consideradas en [1]. Lozano-Pérez et al. describen como sintetizar estrategias de movimientos de compliance con restricciones geométricas e incertidumbres [2]. Muchos investigadores resolvieron este problema utilizando un sistema de control híbrido fuerza/posición. Empleando varios métodos reducen las incertidumbres en la posición y la fuerza aplicada [3, 4].

El control borroso (Fuzzy) ha sido utilizado en los trabajo [5, 6] que describen una metodología de control borroso (Fuzzy) para el montaje de PiH.

Numerosos trabajos han sido desarrollados sobre el aprendizaje de PiH [7]. Un modelo de Markov oculto para hallar las relaciones entre los movimientos ha sido implementado usando un aprendizaje de habilidades basado en la demostración humana [8]. El aprendizaje por refuerzo ha sido desarrollado para el montaje de PiH en una simulación 2D de PiH para desarrollar un sistema experto [9], en 2D utilizando un complaint manipulador [10], y basado en redes neuronales [11] donde se utilizó la relación entre los valores de posición, fuerza y velocidad para enseñar a un manipulador de 6 GDL a insertar el objeto en el agujero.

Ha habido un gran número de trabajos de investigación en el uso de compliance pasivos en la tarea de PiH. Estos trabajos se centran en la utilización de dispositivos especiales para ayudar al robot en la tarea de inserción [12]. Otros autores desarrollaron un hardware implementado en el objeto para asegurar una inserción óptima [13]. Zinn et al., proponen un sistema de DM2 con muelle pasivo en la articulación para garantizar la seguridad y un control óptimo de la fuerza [14]. Para ello, emplearon dos actuadores por articulación para que el manipulador cuente con un buen comportamiento al nivel de control de fuerza en todo el rango. Un sistema MIA que cuenta con 7 articulaciones de

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

compliance pasivo de rigidez variable ha sido presentado en [15]. Yun et al., introducen un brazo robótico seguro basado en un muelle de torsión, un amortiguador de viscosidad variable, y una superficie suave [16].

Bodenhagen et al., presentan un sistema para llevar a cabo tareas de PiH con objetos flexibles. Emplean la estimación de densidad Kernel para reflejar las diferentes variaciones de las características del objeto debido a la acción [17].

En este artículo, la fase de planificación se lleva a cabo empleando las DMPs, por tanto se realizará una introducción previamente sobre estas DMPs. Se han utilizado DMPs discretas en este trabajo, ya que permiten codificar las políticas de control para movimientos discretos de punto a punto. Las DMPs se basan en sistemas de ecuaciones diferenciales de segundo orden, que modelan las propiedades del movimiento deseado [18]. Las ecuaciones para movimientos periódicos y discretos han sido desarrolladas [19] y demuestran el aprendizaje de tareas como jugar al tenis y tocar la batería. Las motivaciones más importantes de la utilización de DMPs son lo siguiente: el mecanismo de la detención de fase [20] que se puede utilizar para reducir la velocidad de la ejecución del robot. La posibilidad de tener en cuenta perturbaciones externas e incluir información de realimentación. Al añadir esta información de realimentación se puede ajustar el tiempo de ejecución [21] y/o evitar ciertas áreas del espacio del trabajo. Otra aproximación basada en la idea de sistemas dinámicos de Ijspeert et al. se describe en [22], donde la trayectoria final se genera como una combinación lineal entre las dinámicas de atracción y modelos mixtos de Gauss aprendidos de trayectorias modelos.

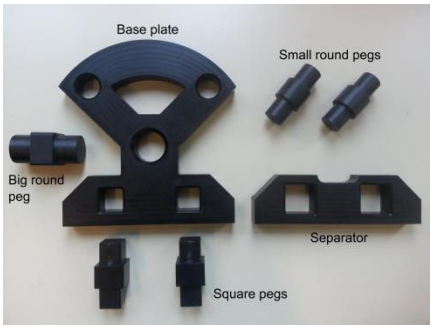


Figura 1: Cranfield Benchmark.

En este artículo, la evaluación del algoritmo de la inserción de un objeto en un agujero ha sido realizada utilizando el modelo Cranfield, (Figura 1) [23], el cual es considerado un estándar en las tareas de ensamblaje en robótica. Requiere la inserción de diferentes objetos tanto redondos como cuadrados en los correspondientes agujeros.

2 DMPs

Las DMPs proporcionan un contexto completo de las especificaciones de las políticas de control del robot. Están basadas en ecuaciones diferenciales no lineales y proporcionan como resultado políticas de control cinemático suaves, esenciales para realizar las tareas de ensamblaje de forma robusta y autónoma [24]. Una DMP para una trayectoria y de solo un grado de libertad se define como el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales no lineales [25].

$$\tau \dot{z} = \alpha_z(\beta_z(g - y) - z) + f(x) \quad (1)$$

$$\tau \dot{y} = z \quad (2)$$

$$\tau \dot{x} = -\alpha_x x \quad (3)$$

con un valor inicial $x(0) = 1$. La solución de (3) viene dada por:

$$x(t) = e^{-\alpha_x t/\tau} \quad (4)$$

donde x es la variable fase y z es una variable auxiliar. β_z se selecciona apropiadamente, $\alpha_z = 4\beta_z$, $\alpha_x > 0$, y $\tau > 0$, este sistema tiene un único punto de atracción $y = g, z = 0$. $f(x)$ se define como una combinación lineal de N funciones no lineales de base radial, las cuales permiten al robot seguir una trayectoria suave desde la posición inicial y_0 hasta la configuración final g

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^{N} \Psi_i(x)} x(g - y_0) \quad (5)$$

$$\Psi_i(x) = \exp(-h_i(x - c_i)^2) \quad (6)$$

donde c_i es el centro de la distribución Gaussiana a lo largo de la fase de la trayectoria y h_i es su ancho. Para una determinada N y considerando la constante del tiempo $\tau = t_T$ se puede definir $c_i = \exp\left(-\alpha_x \frac{i-1}{N-1}\right)$, $h_i = \frac{1}{(c_{i+1} - c_i)^2}$, $h_N = h_{N-1}$, $i = 0, \ldots, N$. Para cada grado de libertad cartesiana, el peso w_i es estimado mediante los datos medidos utilizando regresión [26], siendo g la última configuración guardada durante la trayectoria. De esta forma se obtiene la trayectoria deseada para la introducción del objeto en el agujero.

Dado que las DMPs discretas han sido diseñadas para representar movimientos discretos punto a punto, el movimiento de entrenamiento debe terminar en una posición totalmente estática al final de la trayectoria siempre que el robot tenga que permanecer en el punto de atracción una vez transcurrido el tiempo t_T.

En las ecuaciones anteriores α_x, α_z, y β_z son constantes. Sus valores son determinados de forma que se aseguran la convergencia de la dinámica del sistema. En el caso particular de este trabajo; $\alpha_x = 2$, $\beta_z = 3$, $\alpha_z = 4\beta_z = 12$.

2.1 DETENCIÓN DE FASE

Normalmente, la Eq. (3) no está analíticamente integrada en (4). En su lugar, a la hora de ejecución (3) y (2) se modifican de la siguiente forma

$$\tau \dot{x} = -\frac{\alpha_x x}{1 + \alpha_{px} |\bar{y} - y|} \quad (7)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$\tau\dot{y} = 1 + \alpha_{py}(\bar{y} - y) \quad (8)$$

donde y e $\bar{y}$ respectivamente denotan la posición deseada y la posición actual del robot. Nótese que si el robot no es capaz de seguir la trayectoria deseada $\alpha_{px}|\bar{y} - y|$ aumenta, lo que provoca pequeños cambios en la fase x. Así pues, la evolución de la fase se detiene hasta que el robot recupera la configuración deseada y, Figura 2. Por otro lado, si el robot sigue el movimiento deseado de forma precisa, la ecuación (7) funciona de la misma forma que la (3).

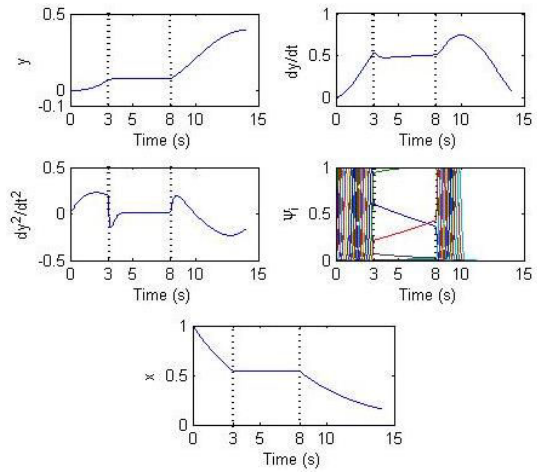


Figura 3: generador de patrones discretos con reacción ante perturbaciones empleando frenado de realimentación "slow down feedback". La posición deseada y, y la actual $\bar{y}$ se suponen idénticas excepto durante un corto periodo de tiempo en el cual la posición $\bar{y}$ es fijada a un valor entre t = 3 s at = 8 s

3 PEG-IN-HOLE

En esta sección se desarrolla la estrategia completa empleada a la hora de llevar a cabo la operación de PiH. Esta tarea es una parte del proceso de ensamblaje automático, en donde la posición del objeto es obtenida mediante elementos de visión. Debido a las incertidumbres propias de los sistemas de visión, se requiere una técnica de búsqueda fina con realimentación de fuerzas. En consecuencia, es concebible la idea de equipar al elemento final con un dispositivo mecánico formado por muelles y amortiguadores. Tal y como se detalla en [27], las inserciones en PiH se pueden facilitar introduciendo de forma apropiada pequeñas rigideces laterales y rotacionales en el mecanismo de agarre.

Dispositivos mecánicos pasivos como los RCC son capaces de proporcionar respuestas rápidas, y son relativamente baratos. Sin embargo, sus aplicaciones están limitadas a tareas muy específicas – el RCC, por ejemplo, solo puede lidiar con objetos de una determinada longitud y orientación con respecto a la mano. Un dispositivo activo programable, en contraste, permitiría la manipulación de diferentes objetos, o la modificación del comportamiento elástico del elemento actuador, de acuerdo con las diferentes fases del ensamblaje.

El enfoque del elemento pasivo es necesario para facilitar el proceso de inserción y reducir las fuerzas de contacto con la superficie.

Los posibles casos de contacto mostrados en la Figura 3 cambiarán al caso 3 o al 5 cuando el robot experimente fuerzas desde arriba hacia abajo.

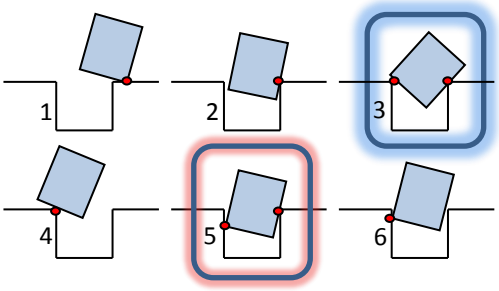


Figura 4: Posibles casos de contacto.

Objetos redondos y cuadrados son implementados en un entorno en el cual el contacto se modela empleando un muelle virtual, y el manipulador de 3 GDL es modelado empleando compliance pasivo.

La solución propuesta es robusta ante pequeñas o moderadas desviaciones en las dimensiones o en las posiciones de los objetos del entorno. No obstante, puede fallar con desviaciones mayores. Las principales incertidumbres en este trabajo se deben al sistema de visión. Se ha utilizado un sensor Kinect para adquirir la información 3D de la escena [28], de forma que se pueda estimar la posición de los objetos en base a la nube de puntos obtenida. Para los objetos mostrados en (Fig 1), se emplean los modelos CAD, y se extraen sus correspondientes nubes de puntos para poder emplear el algoritmo de estimación de la posición. Así pues, la fuente principal de incertidumbres del sistema se debe a los errores de calibración del sensor Kinect. Recientemente se ha demostrado que el error de profundidad de este sensor es de hasta 5 mm a una distancia de 1 m [29]. La siguiente fuente de errores recae en la calibración externa entre la Kinect y el propio robot. En este trabajo se ha empleado la calibración mano-ojo de forma manual, en donde el robot se sitúa en un amplio número de diferentes configuraciones, y a continuación se mide la posición de un punto fijo conocido (tool center point) con respecto al sistema de coordenadas del robot (usando cinemática directa), y al sistema de coordenadas de la cámara (empleando una interfaz gráfica que permite al usuario resaltar el punto fijo en la nube de puntos). La transformación relativa entre los puntos en los diferentes sistemas de coordenadas puede ser estimada empleando el valor de descomposición de la matriz de covarianza [30]. Aunque este método

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

proporciona una estimación óptima, el resultado se ve ampliamente afectado por errores sistemáticos o por el ruido en las mediciones. Finalmente, la estimación de la posición introduce ciertos errores. A pesar de que se aplica un proceso de refinado [31] a cada estimación, la precisión del resultado final se sigue viendo afectada por el ruido del sensor. Incluso en el caso de una alineación perfecta, la estimación de la posición produce un error de desplazamiento de hasta 5 mm a una distancia de 1 m del sensor.

Para superar todos estos problemas, y poder realizar una inserción exitosa, se llevan a cabo las siguientes fases.

1. Fase de verificación: esta fase se subdivide a su vez en dos pasos:
   a. *Aproximación*: Mover la herramienta del robot hacia abajo, en la coordenada z-global, empleando un control de fuerza implícito para detectar la superficie de contacto. En el caso de un objeto cuadrado, la aproximación al mismo se lleva a cabo a través de sus esquinas.
   b. *Verificación*: Debido a la precisión limitada del sistema de visión, no es posible saber si el robot se encuentra en la posición inicial requerida sobre el agujero sobre el que se quiere realizar la operación PiH de forma adecuada. Por lo tanto, el primer paso debe ser verificar que la posición inicial es la adecuada. Dado que no es posible confiar en el sistema de visión, se utilizan sensores de fuerza en su lugar. La verificación se ejecuta siguiendo los siguientes pasos, en donde se asume que el objeto se encuentra en el plano *X-Y* (ver Figura 4).
      - Establecer el contacto con el entorno empleando control híbrido fuerza-par (Eqs. (10) y (11)) definiendo la fuerza en la dirección del eje *Z*.
      - Llevar a cabo un movimiento lineal en el eje *X* global desde la posición actual, mediante desplazamientos de dx y $-dx$.
      - Determinar la posición *Z* mínima y moverse hasta ese punto.
      - Llevar a cabo un movimiento lineal en el eje *Y* global, con desplazamientos en dy and $-dy$.
      - Determinar la posición mínima en el eje *Z*. Si ese mínimo existe, se ha alcanzado el agujero y la posición resultante es p_p correspondiente a la posición de la penetración máxima posible del objeto en el agujero.
        Si no se ha encontrado ese mínimo en el eje *Z*, durante el proceso de verificación, se procede con el siguiente paso, que es el de búsqueda del agujero mediante estrategia de excepción. Nótese que la penetración máxima, el punto p_p, no corresponde con el centro del agujero.

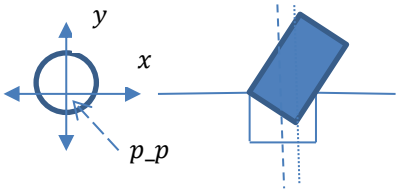


Figura 5: Fase de verificación: el Robot busca el punto de penetración máxima desplazándose a lo largo de los ejes X e Y globales.

Si el proceso anterior no ha sido satisfactorio, y no se ha encontrado el punto de penetración máxima (el punto p_p) se procede con la siguiente estrategia de excepción:

2. Fase de búsqueda (Figura 5): se emplea un algoritmo de búsqueda estocástica para detectar el agujero. Este algoritmo realiza pequeños incrementos aleatorios ε en el eje x y en el y. Los valores de ε son tomados aleatoriamente dentro de un círculo de un diámetro específico. En este caso, se ha empleado un diámetro de 1.5 cm.

$$\begin{bmatrix} x_{new} \\ y_{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

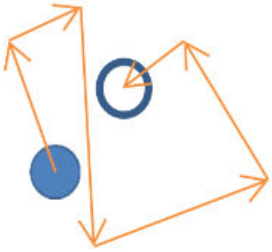


Figura 6: Búsqueda estocástica.

3. Fase de búsqueda fina: se busca dentro del agujero empleando el algoritmo de búsqueda estocástica para hallar la posible máxima penetración dentro del agujero. Para ello se incorporan pequeños incrementos aleatorios ε en x y en y. Los valores de estos ε son tomados de forma aleatoria dentro de un círculo de diámetro específico. Esta vez, dicho diámetro es menor, para poder afinar la búsqueda y encontrar el punto mínimo. En este experimento se ha tomado un diámetro de 0.5 cm.
4. Alineación con el plano *XY* (solo con objeto cuadrado): girar el objeto alrededor de su eje *Z* para alinear el lado del objeto con la superficie.
5. Alineación con el eje *X* global (solo con objeto cuadrado): girar el objeto alrededor del eje *Z* global para alinear su lado con el lado del agujero.
6. Fase de inserción: girar el objeto alrededor del eje *X* global y al mismo tiempo, mover el elemento terminal del robot hacia abajo en la dirección del

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

eje Z utilizando el control de fuerza implícito para una inserción completa.

Para objetos redondos, solamente hacen falta las fases 1, 2, 3, y 6.

In la fase de búsqueda se utilizan las DMPs lineales para codificar trayectorias entre estas posiciones aleatorias. Las DMPs lineales implican que $f(x) = 0$ en (1). Durante la ejecución de estas trayectorias, una realimentación de la fuerza se utiliza para actualizar la trayectoria aprendida con el fin de mantener la fuerza de contacto constante con la superficie de la placa base. La velocidad del elemento terminal se calcula como en la siguiente forma

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{S}_v\mathbf{v}_v + \mathbf{K}_F\mathbf{S}_F(\mathbf{F}_m - \mathbf{F}_d) \quad (10)$$

donde $\mathbf{v}_r$ representa el vector de velocidades resuelto, $\mathbf{S}_v$ para la matriz de selección de velocidad, $\mathbf{v}_v$ para el vector de velocidades deseadas, $\mathbf{K}_F$ para la matriz de ganancia de fuerza, $\mathbf{S}_F$ para la matriz de selección de la fuerza, $\mathbf{F}_m$ para la fuerza medida, y $\mathbf{F}_d$ denota el desplazamiento de fuerza que determina el comportamiento del robot cuando no está en contacto con el entorno. Para obtener las posiciones deseadas utilizamos

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_r + \int \mathbf{v}_r dt \quad (11)$$

donde $\mathbf{y}_r$ es la posición / orientación inicial deseada y $\mathbf{y}$ es la posición / orientación reales. En este enfoque podemos modificar en línea la trayectoria del movimiento aprendido mediante la actualización de los grados de libertad seleccionados. Matrices $\mathbf{S}_v$ y $\mathbf{S}_F$ son a menudo diagonal y se utilizan para seleccionar los grados de libertad que se actualizan mediante la realimentación de fuerza. Esto conduce a lo que se conoce como control híbrido. En un esquema de control híbrido, se requiere que el manipulador tenga que seguir la superficie del entorno a una velocidad dada, mientras que mantenga una fuerza de contacto deseada $\mathbf{F}_d$. Tales esquemas de control pueden ser escritos con una adecuada selección de los vectores $\boldsymbol{\sigma}$, por ejemplo $\boldsymbol{\sigma} = [1; 1; 1; 0; 0; 0]^{\mathrm{T}}$, lo que denota que los GDL de traslación de un manipulador de 6-GDL están controlados, mientras que las rotaciones son la fuerza controlada. Así, la ecuación (10) se convierte en

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_r = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\sigma})\mathbf{v}_v + \mathbf{K}_F\big(\mathbf{I} - \mathrm{diag}(\boldsymbol{\sigma})\big)(\mathbf{F}_m \\ - \mathbf{F}_d), \quad \mathrm{diag}(\boldsymbol{\sigma}) \\ = \begin{bmatrix}\sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_6\end{bmatrix}\end{aligned} \quad (12)$$

Notese que la matriz de selección de velocidad $\mathbf{S}_v$ y la matriz de selección de la fuerza $\mathbf{S}_F$ son complementarios; $\mathbf{S}_F = \mathrm{I} - \mathbf{S}_v$. Técnicamente esto significa que un solo GDL no puede ser al mismo tiempo la fuerza y la trayectoria controlada.

La matriz de ganancia de fuerza $\mathbf{K}_F$, de la ecuación (10), multiplicado por la fuerza medida (o fuerza medida menos la fuerza deseada), da la velocidad del elemento terminal. Físicamente, la matriz de ganancia de fuerza se puede comparar con la matriz de rigidez (denotado generalmente por $\mathbf{K}$), lo que significa hasta qué punto el entorno o el robot deforma / mueve cuando se aplica una fuerza a ella. La rigidez y la matriz de compliance (denotado generalmente por $\mathbf{C}$) están relacionados de manera que $\mathbf{C} = \mathbf{K}^{-1}$.

Para el caso de movimiento sobre una superficie plana, donde sólo se necesita la altura (la dirección Z) para ser actualizado, las ecuaciones se simplifican considerablemente. Mediante el uso de $\mathrm{S_v} = \mathrm{diag}(1;\ 1;\ 0;\ 1; 1; 1)$, $\mathrm{K_F} = \mathrm{diag}(0;\ 0;\ \mathrm{k_F};\ 0;\ 0; 0)$, $\mathrm{S_F} = \mathrm{diag}(0; 0; 1; 0; 0; 0)$. La altura en Z deseada del elemento terminal en cada paso de tiempo discreto Δt se calcula como

$$\dot{z}(t) = k_F(F_z(t) - F_d) \quad (13)$$

$$z(t) = z_0 + \dot{z}(t)\Delta t \quad (14)$$

Aquí z_0 es la altura inicial, k_F es la ganancia de la fuerza [kg/s], F_z es la fuerza medida en la dirección Z y F_d es la fuerza deseada que el robot tiene que presionar sobre el objeto. Tal formulación del movimiento asegura un movimiento constante en la dirección$-Z$, o el contacto constante cuando se encuentra un objeto.

4 EXPERIMENTOS

Las plantillas de movimientos han sido obtenidas a partir numerosas demonstraciones humanas empleando guiado cinestésico. La trayectoria prototipo se obtiene a partir de varios ejemplos (muestras) de trayectorias utilizando el LWPR (Locally Weighted Projected Regression). Las posiciones y orientaciones, además de las fuerzas resultantes se registran durante la demonstración. Durante la ejecución de la trayectoria usando DMP, la trayectoria real se modifica de acuerdo al error de fuerza correspondiente. La reducción de la velocidad la velocidad de realimentación asegura que el movimiento controlado por DMPs se ralentiza o se detiene siempre que el objeto (Peg) se atasca en el agujero (Hole) (o cuando la fuerzas superan los valores permitidos).

En esta demonstración de PiH se ha usado el Benchmark de Cranfield, Figura 1. Este benchmark se considera un estándar para las operaciones de ensamblado por robots manipuladores. En este experimento se ha usado un objeto redondo y cuadrado para la prueba. El experimento ha pasado las fases explicadas anteriormente para conseguir una inserción exótica como muestran las figuras 7 y 8. La Figura 7 muestra el intermedio de la evolución de la fuerza de control y el control de posición en el eje Z durante la fase de búsqueda. En la Figura 7-(a) se puede observar que el error en la posición en el eje Z mantiene el valor cero hasta el momento que encuentre el agujero y empieza la fase de inserción. Entre los valores de 700s y 750s se puede observar los cambios en Z que indican la fase de la búsqueda fina. En la Figura 7-(b) se muestra la fuerza en la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dirección -*Z* que indica una fuerza de contacto constante con la superficie y la (c) muestra el error en estas fuerzas. El promedio de la evolución de las fuerzas durante la inserción se muestra en la Figura 8. En esa figura se puede ver que las fuerzas justo antes de la inserción estaban a valore cercos de cero y en la inserción se puede observar mucha fuerza en la dirección *Z* donde el robot intenta presionar para hacer la inserción y algunas fuerzas y pares en las otras direcciones por los contactos con las paredes del agujero.

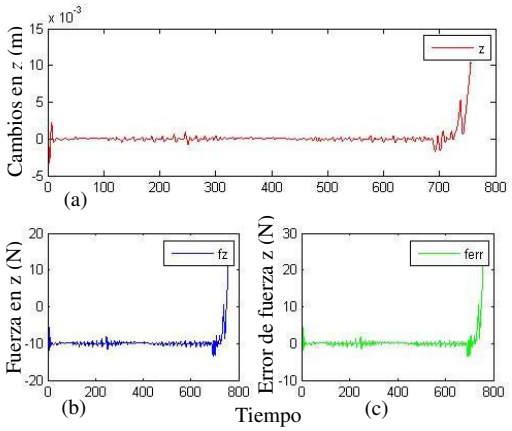


Figura 7: La posición y las fuerzas en la dirección del eje *Z* durante la fase de búsqueda.

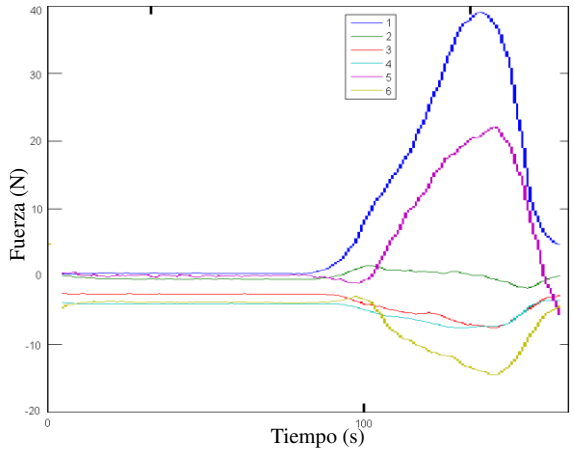


Figura 8: Las fuerzas durante la inserción.

5 CONCLUSION

En este trabajo, se han empleado las DMPs para resolver el problema de la inserción de un objeto en un agujero - PiH. Se han empleado las DMPs con realimentación de fuerza, in combinación con trayectorias hibridas donde el control de fuerza ha sido implementado y probado como una solución candidata para la tarea PiH. Los experimentos han sido realizados en simulación usando ROBWORKS y con el robot real LWR. En este trabajo se ha utilizado la detención de fase para frenar el robot en la fase de la alineación con el eje *X* global (solo con objeto cuadrado): girar el objeto alrededor del eje *Z*. Mientras el robot está girando y justo y justo cuando empieza a tocar la pared del agujera entonces empiezan a subir las fuerzas de contacto que se utilizan para detener la fase y consecuentemente detener el movimiento del robot y empezar la fase de inserción.

Como trabajo futuro se propone utilizar los algoritmos de lo que se llama Curve Matching, para comparar la estabilidad y la tasa de éxitos de los experimentos entre estas dos metodologías.

Referencias

[1] H. Bruyninckx, S. Dutre, and J. De Schutter, "Peg-on-hole: a model based solution to peg and hole alignment." pp. 1919-1924.

[2] T. Lozano-pérez, M. T. Mason, and R. H. Taylor, "Automatic Synthesis of Fine-Motion Strategies for Robots," *International Journal of Robotics Research,* vol. 3, no. 1, 1984.

[3] J. Morrow, and P. Khosla, "Manipulation Task Primitives for Composing Robot Skills." pp. 3354-3359.

[4] S. R. Chhatpar, and M. S. Branicky, "Search strategies for peg-in-hole assemblies with position uncertainty." pp. 1465-1470.

[5] P. Nguyen, and F. Naghdy, "Fuzzy control of automatic peg-in-hole insertion." pp. 134-139.

[6] F. Naghdy, and J. Lukasiaks, "Neuro-fuzzy control of robotics peg-in-hole insertion." pp. 234-239.

[7] K. Ogawara, J. Takamatsu, S. Iba, T. Tanuki, H. Kimura, and K. Ikeuchi, "Acquiring hand-action models in task and behavior levels by a learning robot through observing human demonstrations."

[8] G. E. Hovland, P. Sikka, and B. J. McCarragher, "Skill acquisition from human demonstration using a hidden Markov model." pp. 2706-2711 vol.3.

[9] L. Sukhan, and M. H. Kim, "Learning expert systems for robot fine motion control." pp. 534-544.

[10] S.-k. Yun, "Compliant manipulation for peg-in-hole: Is passive compliance a key to learn contact motion?." pp. 1647-1652.

[11] V. Gullapalli, A. G. Barto, and R. A. Grupen, "Learning admittance mappings for force-guided assembly." pp. 2633-2638.

[12] W. R. Southern, and C. G. Lyons, "The study of a passive accommodation device in robotic insertion processes," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 124, no. 3, pp. 261-266, 6/20/, 2002.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[13] W. Haskiya, K. Maycock, and J. A. G. Knight, "A passive compliant wrist for chamferless peg-in-hole assembly operation from vertical and horizontal directions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* vol. 212, no. 6, pp. 473-478, June 1, 1998, 1998.

[14] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. K. Salisbury, "Playing it safe [human-friendly robots]," *IEEE Robotics & Automation Magazine,* vol. 11, no. 2, pp. 12-21, 2004.

[15] T. Morita, and S. Sugano, "Development and evaluation of seven DOF MIA ARM." pp. 462-467.

[16] S.-k. Yun, S. Kang, M. Kim, and S.-S. Yoon, "Input preshaping control of the safe arm with MR-based passive compliant joints." pp. 2788-2793.

[17] L. Bodenhagen, A. R. Fugl, M. Willatzen, H. G. Petersen, and N. Krüger, "Learning Peg-In-Hole Actions with Flexible Objects."

[18] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi, and S. Schaal, "Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots." pp. 1398-1403.

[19] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi, and S. Schaal, "Learning rhythmic movements by demonstration using nonlinear oscillators." pp. 958-963.

[20] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi, and S. Schaal, "Nonlinear dynamical systems for imitation with humanoid robots." pp. 219-226.

[21] S. Schaal, P. Mohajerian, and A. Ijspeert, "Dynamics systems vs. optimal control—a unifying view," *Progress in brain research,* vol. 165, pp. 425-445, 2007.

[22] M. Hersch, F. Guenter, S. Calinon, and A. Billard, "Dynamical System Modulation for Robot Learning via Kinesthetic Demonstrations," *IEEE Transactions on Robotics,* vol. 24, no. 6, pp. 1463-1467, 2008.

[23] K. Collins, A. J. Palmer, and K. Rathmill, "The development of a European benchmark for the comparison of assembly robot programming systems," *Robot Technology and Applications*, K. Rathmill, P. MacConail, S. O'leary and J. Browne, eds., pp. 187-199, New York: Springer-Verlag, 1985.

[24] B. Nemec, and A. Ude, "Action sequencing using dynamic movement primitives," *Robotica,* vol. 30, no. 5, pp. 837-846, 2012.

[25] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi, H. Hoffmann, P. Pastor, and S. Schaal, "Dynamical Movement Primitives: Learning attractor models for motor behaviors," *Neural Computation,* vol. 25, pp. 328-373, 2013.

[26] A. Ude, A. Gams, T. Asfour, and J. Morimoto, "Tasks-specific generalization of discrete and periodic dynamic movement primitives," *IEEE Transactions on Robotics and Autonomous Systems,* vol. 26, no. 5, pp. 800-815, 2010.

[27] H. Asada, and J. J. Slotine, *Robot Analysis and Control*, 1 ed.: J. Wiley, 1968.

[28] A. G. Buch, D. Kraft, J.-K. Kamarainen, H. G. Petersen, and N. Kruger, "Pose estimation using local structure-specific shape and appearance context." pp. 1050-4729.

[29] D. Herrera C., J. Kannala, and J. Heikkila, "Joint depth and color camera calibration with distortion correction," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol. 34, no. 10, pp. 2058-2064, 2012.

[30] W. Kabsch, "A solution for the best rotation to relate two sets of vectors," *Acta Crystallographica Section A,* vol. 32, no. 5, pp. 922-923, 1976.

[31] P. J. Besl, and N. D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Gliif: Beyond QR Codes

Oscar Deniz, J.M. Gutierrez, Jesus Salido, Gloria Bueno
VISILAB, Universidad de Castilla-La Mancha, Spain
Email: *Oscar.Deniz@uclm.es*

Alan Bologlu
GLIIF LLC. Mountain View, CA, USA
Email: *alan@gliif.com*

Abstract

Whereas QR codes are being used massively for several applications, it is not widely-known that they are patented. Companies owning patent rights have begun to file lawsuits for the use of QR codes in specific scenarios. Apart from that, QR codes are visually unpleasant, they have been designed to be read by machines, not humans. This paper describes a novel code, the Gliif, which has been engineered to blend into existing artwork to seamlessly create interactivity into every piece of marketing material generated. Every Gliif generated has a unique identifier (among 10 trillion different values). The paper describes the work required both in the App and server sides, with emphasis on the advanced computer vision techniques that have been required.

Palabras clave: QR codes, computer vision, mobile Apps.

1 Introduction

QR codes have become an immensely popular means of linking the physical and digital worlds [1]. These codes, first designed for the automotive industry in Japan, are now widely used for product tracking, document management, item identification, advertising, etc. While they are mostly used to redirect the user to a URL, more advanced applications are possible. When the URL points to a proxy server that redirects to the company URL, analytics can be obtained. This will include data such as total hits, country, operating system, hits per day, etc. The data is mostly based on the data exposed by the mobile device at the moment of scanning the code. In advertising, QR code tracking (i.e. counting the hits for specific campaign QR codes), is achieved by generating multiple short URLs (short URLs are decoded in a URL shortener server which redirects to a typically larger (or difficult to remember) URL. Example shortening services are bit.ly and tinyurl.com). The QR codes scanned embed these short URLs, which redirect the user to the correct campaign URL while hits are counted for each campaign.

However, few people know that QR codes are patented by a number of companies. One company owning QR code-related patents has chosen not to exercise his rights. However, at least one other company has already initiated lawsuits for patent infringement related to the use of QR codes. More specifically, the patent violated in this case refers to "the use of QR codes that contain any index that is sent to a server and used to lookup the URL of the content server, which is then returned to the user device to enable it to connect with the content server" [2, 3]. Pending litigation in the QR code space is concerning.

Another problem of QR codes is that they are not visually pleasant. Technically-minded people do not quite see how unaesthetic QR codes are [4]. Despite attempts at embellishing traditional QR codes, see [5], the fact is that they are designed to be read by machines, their target market is computers not consumers. That is the reason why many top brands do not use them extensively (think of Vogue magazines). A similar problem occurs with Microsoft Tags [6]. On the other hand, QR codes can be malicious in nature, so security is another concern.

There have been recent attempts at providing less disruptive codes. The digital watermarking technology embeds codes in images, as in Digimarc's Discover [7]. Digital watermarking is very similar to steganography [8], the practice of concealing messages in images. The Discover mark is invisible to a human's eye, and so it is not visually disruptive. However, users do not know that something is behind the photo, which means that an icon and instructions on the download of the app have to be placed near the photo. The technique is certainly useful to conceal data, not to expose it, so QR and watermarking are actually extreme opposites. The TouchCode technology [9] uses a special ink for printing codes. This ink interacts with the smartphone's capacitive screen, much like our fingers do. It is not clear, however, what is the cost involved in such special printing process. Besides, the codes themselves cannot be read when images are displayed on screens. Documobi iPR [10] and Ricoh's Clickable Paper [11] use the photo itself as

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

the code. The image captured by the smartphone is matched with the photos stored in a remote database. Image recognition can, however, be less than robust in unrestricted conditions. Besides, as more images are uploaded to the database the possibility of false positives and errors increase.

In this scenario, we describe a novel code, called Gliif, that serves the same purpose of QR codes. Besides having a less disruptive appearance, billions of different codes can be generated and tracked with added security. Gliif is currently in beta. This paper is organized as follows. Section 2 gives an overview of the system. Sections 3 and 5 describe the mobile and server sides of the system. Finally, the main conclusions are outlined in Section 6.

2 Gliif Overview

Figure 2 shows two example Gliif codes. These codes admit a logo at the center, and they can be themselves embedded into advertisements or other printed media (including screens), see Figure 3. A Gliif can be blended into a publication or made to stand out. Compare QR codes and Gliif codes in Figure 1.

Figure 1: Compare the visual appearance of Gliif and QR codes.

Essentially, the starred pattern encodes unique information that can be used to link to the digital content. Figure 4 shows the main use case. First the user scans a Gliif code. The Gliif code image is then sent to a server which, using advanced decoding algorithms, obtains the associated information (typically a URL). The decoded information is then sent back to the user.

Figure 2: Two example Gliif codes with logo inserts.

Figure 3: Example advertisements with Gliif codes.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figure 4: Overview of the Gliif system.

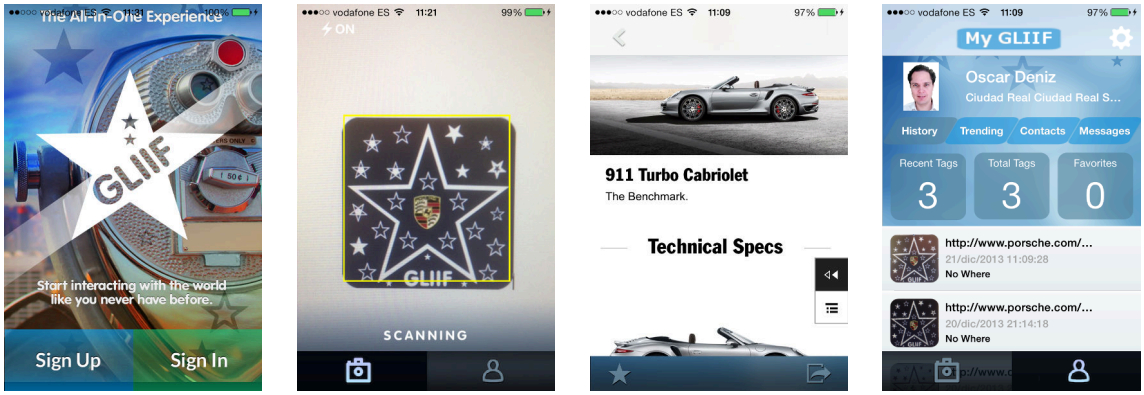


Figure 5: Gliif App screenshots.

3 Gliif App

The Gliif App for iOS allows the user to scan Gliif codes, Figure 5 shows four screenshots. The user has to sign up or sign in with an existing account (the user can also sign up through the Gliif web). Then he can point the smartphone to a Gliif code, which is sent to the Gliif decoding server. The server returns information associated to that Gliif code, such as an URL, which is displayed within the App. Scanned codes are kept in the user's history in the server and can be also displayed in the App.

The main purpose of the App is to automatically detect the Gliif code, capture a sharp image of it and send it to the server for decoding. In the following the main stages involved are described.

Gliif codes can be as small as 1" wide. The smartphone may therefore be very close to the printed code. This implies that focusing has to be tightly controlled. Exposure is also controlled in the App in order to get a clear image. The next step is to search for the GLIIF word, which is always at the bottom of the code, see Figure 6. This was done using the Stroke Width Transform (SWT) [12], which is both robust and efficient. Even though SWT is relatively fast, in the smartphone it took roughly 3 seconds to process a single frame (iPhone 4S). Our decision was to overlay a centered yellow viewfinder box over the live capture image. The viewfinder box is 700 by 700 pixels. The user has to keep the Gliif code roughly inside the box. This way, the GLIIF word search was performed only in the region within the lower half of the viewfinder box, thus accelerating detection significantly. After detection the word, we had to ensure that the word was GLIIF. OCR was out of the question for efficiency reasons, so a simpler width/height ratio check was imposed. Using Fig-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ure 6, this ratio was measured, having a value of 3. Note that such check can be passed by any word having a similar ratio (roughly any 5-letter word), although this was more than sufficient in our case.

Figure 6: Fixed assets in a Gliif code.

The Gliif code may be rotated in the image, a rotation has to be performed. Note that the word localizer will always give a horizontal rectangle, even though the code is skewed, see Figure 7-left. There are techniques such as the Hough transform that can be used to detect the skew angle of text lines. However, a simpler and computationally more efficient solution was needed. The word region was thresholded and then a search was performed for the first text pixel above letters G and F, see Figure 7-right. From these two heights a skew angle could be obtained. In other words, text rotation was determined from vertical offset of letters "G" and "F" with respect to the detected text box.

Figure 7: Skew angle estimation.

Since there is a fixed relation between the GLIIF word height and the height and width of the whole code, it is possible to infer the latter. Thus, from the position and height of the detected word rectangle, the position and size of the whole code is inferred. However, when the Gliif code is rotated in the image, the height of the rectangle differs from the height of the word GLIIF (see Figure 7-left). In order to correct the measured rectangle height, we have to consider the following problem: If I have a rectangle rotated at a known angle with respect to a rectangle of known dimensions that encloses it, how can I find the dimensions of the inscribed/inner rectangle?, see Figure 8.

In this case, it is easy to see that:

$$X = h\sin(\alpha) + w\cos(\alpha) \tag{1}$$

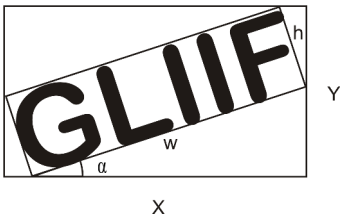


Figure 8: Rectangles considered for height correction.

$$Y = w\sin(\alpha) + h\cos(\alpha) \tag{2}$$

then, taking into account that $w = 3h$, it can be shown that:

$$h = \frac{X}{3\cos(\alpha) + \sin(\alpha)} \tag{3}$$

which provides the correct height h.

Once we have the inferred limits of the whole Gliif code and angle α, the region is warped to a horizontal box of fixed dimensions 700x700, see Figure 9, which is then sent to the server for decoding (such high resolution is needed for decoding). Despite the visual complexity of the Gliif code (as compared with QR codes), the techniques implemented allow scanning them in 3-4 seconds (iPhone 4S). The Gliif code detector has been coded using the OpenCV computer vision library[13] in order to ensure portability to Android and desktop platforms. Eventually, an open-source library for Gliif recognition will be made available.

In summary, the detection steps are shown in Algorithm 1.

Apart from the scanning process, the App implements other less complex features. There are two type of Gliif codes: campaign codes and contact codes. The latter are associated to a user, which can generate his/her own Gliif code through the Gliif web. Button 'My GLIIF' (see top of the fourth screenshot in Figure 5) allows to display the user's own contact Gliif. A vCard-type feature has been implemented so that another user can scan that Gliif code and the contact is automatically added to his/her list of contacts.

On the other hand, push notifications are also supported so that user can receive offers and updates about products scanned. The scanning of a Gliif is only the beginning of the communication process. Brands will have the ability to push messages directly to the hyper targeted database that they are building with every scan. This can be used for consumer loyalty programs, event notification etc.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figure 9: Captured images (left) and the corresponding 700x700 image sent to the server (right).

Figure 10: Left: My Gliif. Right: Contacts.

An 'out-of-network' feature has been also implemented. When the user does not have Internet connectivity, the scanned Gliif code is temporarily stored in the smartphone. When connectivity is restored scanned codes are sent to the servers for decoding.

for *Every input frame* **do**
  Adjust camera focus and exposure according to the approximate position of the center of the Gliff word
  Wait until focus/exposure operations finish
  Is there any word inside the lower half of the viewfinder? If not, continue loop
  Check that the word has a width/height ratio of 3, otherwise continue loop
  Threshold image within Gliif word rectangle
  Estimate skew angle
  Correct Gliif word rectangle height using Eq. (3)
  From the height, estimate size of the whole Gliif code, check that is not below a minimum size threshold, otherwise continue loop
  From the height, position and skew angle of the word rectangle, determine corners of the whole Gliif code
  Warp the Gliif code to a horizontal 700x700 image, send it to the server
end

Algorithm 1: Algorithm for Gliif detection.

4 Server-side Gliif

The server side of Gliif includes a web frontend which manages user accounts. As mentioned above, users can create their own Gliifs, see Figure 11. Background/Foreground Gliif colors can be selected (with some contrast limitations, see below).

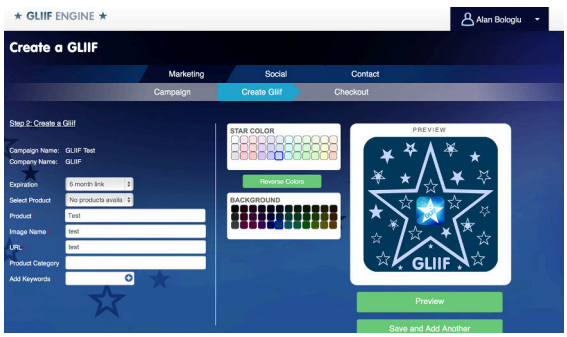


Figure 11: Create Gliif.

The Gliff web services are built on the Yii framework and use technologies such as PHP, MySQL and MongoDB. The encoding/decoding module is the most important part. Unlike the QR Codes which embed URL information, the Gliif technology is embedding a unique serial number into each image and linking this to a specific action

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

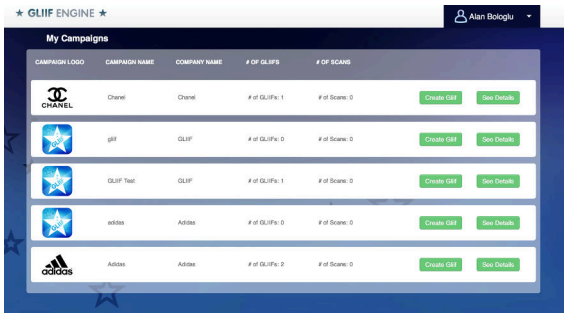


Figure 12: Campaign overview.

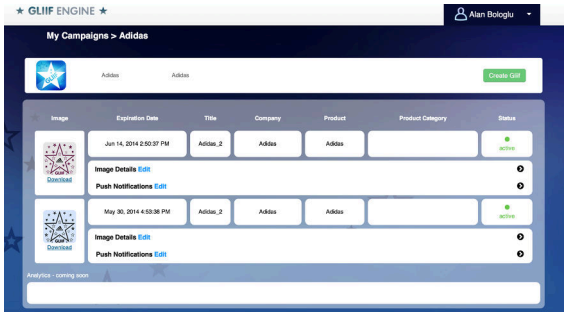


Figure 13: Campaign details.

via server based decoding. This can be a redirection to a URL in the case of advertising or a transaction ID as a mobile payment interface. It is completely cloud-based and there is no decoding at the mobile level for security purposes (if the decoding algorithm runs on each device security problems may eventually arise). The current beta proprietary algorithm is based on measuring star positions and shapes. The algorithm supports the building of 10 trillion unique Gliifs and also incorporates Reed-Solomon error correction. Unique color combinations can be made using RGB selection based on a 128 background/foreground contrast delta. A patent is to be requested for this decoding algorithm.

Note that server-side decoding is more secure than QR decoding, for the sensitive information will be only revealed in the server. With QR codes, the information associated to the code is revealed both in the smartphone and also transmitted through the Internet. That is a serious problem for targeted campaigns in which the content or resources to provide should be restricted. One of the biggest issues with QR codes is that they do not lead to anything of value to the user, so more valuable digital assets are to be expected in the future. In some campaigns the content will not be just a landing page but other actions such as dialing a phone number, obtaining contact details, downloading keys, viewing map locations, etc.

5 Preliminary results

Gliif is currently in beta status. We are currently evaluating performance in many aspects. The current available performance data is shown in Table 1. These values show acceptable figures.

6 Conclusions

QR codes are currently subject to patent litigation. Apart from that, QR codes are visually unpleasant, since they have been designed to be read by machines, not humans. The reader will probably think that they are not unpleasant, but designers and publishing experts have already made that clear. Alternative solutions for QR codes use specific technologies that limit applicability. Most of the technologies require a proprietary application for the content creator, the content consumer, or both. This paper has described a novel code, the Gliif, which has been designed to blend into existing artwork. Every Gliif generated has a unique identifier, with trillions possible codes. The paper has described the work required both in the App and server sides, with emphasis on the advanced computer vision techniques that have been required. Gliif is currently in Beta, the App being available for free in the App Store. In the future, free SDKs will be also released, the only proprietary algorithm being the decoder.

Acknowledgment

The authors from UCLM are partially supported by project TIN2011-24367 from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

References

[1] J. Waters, Ed., *QR Codes for Dummies*. John Wiley & Sons, 2012.

[2] Neomedia Technologies, Inc., "System and method for automatic access of a remote computer over a network," Patent, US Patent 6199048. App. date: March 6th, 2011.

[3] ——, "System and method for using an ordinary article of commerce to access a remote computer," Patent, US Patent 8131597. App. date: June 30th, 2010.

[4] N. Butler, "Scanning the future: Mobile marketing beyond QR codes," http://www.stoppress.co.nz/, [Online; accessed 19-May-2014].

[5] "Visualead," http://www.visualead.com/, [Online; accessed 19-May-2014].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Parameter	Value	Conditions
Time to detect	3.7s and 1.8s	iPhone 4S and iPhone 5s. Gliif code displayed on computer screen
Decoding response time	2.8s	Average, Wifi 54Mbps, measured from the smartphone
Decoding success rate	96%	Average of 52 trials, printed and on-screen Gliif codes, office illumination

Table 1: Preliminary results.

[6] D. Parikh and G. Jancke, "Localization and segmentation of a 2d high capacity color barcode," in *Applications of Computer Vision, 2008. WACV 2008. IEEE Workshop on*, Jan 2008, pp. 1–6.

[7] "Digimarc Discover," http://www.digimarc.com/discover, [Online; accessed 19-May-2014].

[8] H. A. Alaziz, Ed., *Data Hiding and Applications: image watermarking and steganography.* LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.

[9] "Touchcode," http://www.touchcode.de/, [Online; accessed 19-May-2014].

[10] "Documobi," http://documobi.com/, [Online; accessed 19-May-2014].

[11] "Ricoh Clickable Paper," http://rii.ricoh.com/clickable-paper, [Online; accessed 19-May-2014].

[12] B. Epshtein, E. Ofek, and Y. Wexler, "Detecting text in natural scenes with stroke width transform." in *CVPR*. IEEE, 2010, pp. 2963–2970.

[13] "OpenCV, Open Source Computer Vision," http://OpenCV.org, [Online; accessed 19-May-2014].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE VUELO PARA MAV-VTOL BASADAS EN MATLAB STATEFLOW

Pablo Rodríguez[1], Jesús G. Villagómez[2], Manuel Vargas[2], Francisco R. Rubio[2]
[1] *athlonm@gmail.com* , [2] {*villagomez, mvargas, rubio*}*@us.es*
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla

Resumen

Se presenta el desarrollo de una solución para la verificación y validación de sistemas de gobierno y control de vuelo para pequeñas plataformas de tipo VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Para la simulación del vehículo se dispone del correspondiente modelo dinámico, que será interconectado con diferentes subsistemas de control de estabilización y posición, gobernados por una máquina de estados definida en MATLAB Stateflow. El conjunto de simulaciones para la verificación del diseño de la solución propuesta son llevadas a cabo mediante Simulink. El objetivo es disponer de mecanismos que permitan evaluar el correcto funcionamiento de prototipos antes de ser evaluados en condiciones reales.

Palabras clave: Arduino, Docencia, MATLAB Stateflow®, *Quadrotor*, Simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de plataformas MAV-VTOL (Miniature Autonomous Vehicle - Vertical Take Off and Landing) [5] ha experimentado un notable crecimiento en los últimos tiempos. Bien para investigación como para uso doméstico, este tipo de vehículos son ideales principalmente gracias a su bajo coste y al amplio conjunto de aplicaciones en las que permite ser utilizado: desde vigilancia aérea hasta transporte de carga. Su uso está cada vez más extendido e incluso normativas de tipo legal están siendo desarrolladas para poder legislar su aplicación futura en entornos urbanos [1]. En el ámbito de la Academia, existen numerosos trabajos que combinan el estudio de controladores para la estabilización y estimación del estado [4][15], bien en interiores o exteriores, gracias a las posibilidades de expansión sensorial que permiten estos vehículos. La inclusión de sensores exteroceptivos (cámaras, sensores de tipo láser, etc.) al sistema no es más que una evolución del mismo que permite posibilidades de navegación autónoma, incluso en entornos no estructurados. Trabajos recientes ponen de manifiesto la capacidad de ampliación funcional e interacción con el entorno que permiten estas plataformas, mediante la inclusión de pequeños brazos manipuladores [7], actuadores de cámara giro-estabilizados [11] o sensores de presión y contacto para diferentes tipos de aplicaciones [13].

Sin embargo, la integración de los diferentes subsistemas que conforman estas plataformas y su configuración y adaptación no es trivial. Como plataforma aérea robótica, es imprescindible que la combinación de software y hardware embarcado funcione según lo establecido, siendo robusto a fallos de tipo sensorial o bien de pérdida de comunicación con el enlace de tierra, entre otros. En caso contrario, cualquier excepción no contemplada en el desarrollo del software, derivará en un fallo que provocaría grandes desperfectos en la plataforma y riesgos para terceros, con el consiguiente coste económico tanto de materiales como de horas de trabajo. Por ello, la evaluación del software embarcado antes de su uso es imprescindible para poder detectar fallos de codificación o situaciones no contempladas.

Las soluciones actuales, económicamente viables, que combinan hardware y software más extendidas están basadas en entornos de microprogramación en lenguage C/C++ y hardware basado en Arduino, conocidas como Arducopter [2]. Periódicamente la Comunidad aporta nuevas actualizaciones del firmware del dispositivo e incluye nuevas mejoras y funcionalidades. A nivel de investigación, lo que se pretende es poder reutilizar parte de estas aportaciones para poder avanzar en campos como el control o la fusión sensorial, pudiendo acceder a cualquier elemento hw/sw del sistema y poder reconfigurarlo, si fuera necesario. Si bien es una plataforma muy extendida, no es posible una comprobación por simulación del sistema, de tal manera que ante cualquier modificación del código fuente, o bien una reformulación de la lógica de aplicación, la única depuración y verificación posibles, incluyendo el comportamiento de los controladores, es mediante el despegue de la plataforma y comprobando que la evolución de la misma no deriva en situaciones de inestabilidad. Para entornos como investigación y docencia, son situaciones no admisibles.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Se hace por tanto imprescindible el desarrollo de entornos que permitan una simulación completa del sistema para su verificación, control de supervisión, planificación de tareas, gestión de fallos y posterior validación. Es lo que se conoce típicamente como *"Software-in-the-loop"*: como máquina de estados que permite probar el comportamiento del sistema ante cualquier entrada o evento externo, comprobando que la salida se corresponde con lo previamente diseñado. Existen otras técnicas más avanzadas de verificación y validación de modelos software: son las denominadas técnicas basadas en modelo o *"Model checking"* [12][14]. Estas técnicas están basadas en lógicas de tipo modal y descriptiva para la representación del conocimiento y automatización del comportamiento. Son técnicas que permiten una evaluación exhaustiva del sistema. Sin embargo, gráficamente no es posible ver su evolución y a nivel académico son difíciles de implantar a corto o medio plazo.

La solución propuesta en este trabajo, para diseñar e implementar una máquina de control de estados e integrarla en una plataforma de tipo quadrotor, está basada en la combinación de MATLAB Stateflow® y el software de simulación MATLAB Simulink®, muy extendido a nivel académico [16]. Stateflow es un entorno para el modelado y simulación de lógica de decisión combinatoria y secuencial basado en máquinas de estado y diagramas de flujo. Permite la representación de diagramas de transición de estado con el fin de modelar la evolución del sistema ante eventos internos, externos o condiciones basadas en tiempo.

El desarrollo del presente trabajo queda estructurado como sigue: en la sección 2 se presenta brevemente una descripción del modelo dinámico de la plataforma utilizada para la experimentación, de tipo *quadrotor*. Las secciones 3 y 4 presentan en detalle la solución propuesta y diferentes alternativas para la representación de las salidas del sistema, respectivamente. La sección 5 explora la capacidad de integración del diseño propuesto en hardware real y las principales conclusiones y propuestas de trabajo futuro son presentadas en la sección 6.

2. MODELADO DINÁMICO

Uno de los puntos clave de la solución propuesta es la modularidad que presenta. Es posible reutilizar la misma máquina de estados para el gobierno de cualquier plataforma de tipo VTOL, intercambiando el modelo dinámico del vehículo bajo estudio y los controladores de estabilización y posición correspondientes. Así, en esta propuesta, se ha utilizado el modelo dinámico correspondiente a un vehículo denominado *quadrotor*, con 4 motores coplanarios.

Desde el punto de vista dinámico, un *quadrotor* consiste en una masa puntual suspendida en el aire sobre la cual se aplican diferentes fuerzas y momentos, combinando tan sólo las velocidades de los diferentes rotores [4][5]. Para generar un movimiento de balanceo o roll (ángulo ϕ), se produce un desequilibrio entre las fuerzas f_2 y f_4 (Figura 1). Análogamente, para un movimiento de cabeceo o pitch (ángulo θ), el desequilibrio se realizará entre las fuerzas f_1 y f_3. El movimiento de guiñada, o yaw (ámgulo ψ), es resultado del desequilibrio entre los pares de fuerzas (f_1,f_3) y (f_2,f_4) producidas por pares de motores que giran en sentidos opuestos. Como consecuencia de magnitudes positivas en los ángulos de balanceo y cabeceo, se producen movimientos de tipo lateral y longitudinal, respectivamente, consiguiendo así desplazamientos traslacionales. Desde el punto de vista del número de entradas manipulables y grados de libertad, el sistema se considera subactuado, de manera que tan sólo se dispone de 4 señales de actuación (motores $f_{1...4}$) para controlar los 6 grados de libertad (orientación y posición) propios de un sistema aéreo. El empuje total proporcionado por la rotación de los motores se obtendrá como la suma de las fuerzas que ejercen los mismos.

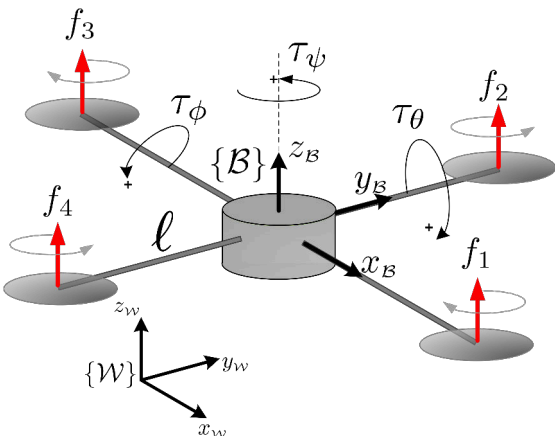


Figura 1: Representación de fuerzas y pares resultantes sobre la estructura de tipo *quadrotor*.

Bajo ciertas consideraciones [15], es posible plantear las ecuaciones que rigen la dinámica en dos subsistemas interconectados: traslación (ecuación 1) y rotación (ecuación 2):

$$m\ddot{\boldsymbol{\xi}} + mg\boldsymbol{e_3} = \boldsymbol{f_\xi} \tag{1}$$

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\tau_\eta} \tag{2}$$

Los principales sistemas de coordenadas relevantes en el modelado son: sistema de referencia inercial,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

supuesto fijo sobre la superficie de la Tierra, $\{\mathcal{W}\}$ (*World coordinate frame*), y el sistema $\{\mathcal{B}\}$ (*Body coordinate frame*), supuesto solidario al movimiento del vehículo. Se tiene que ${}^{\mathcal{W}}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}} = [\text{x y z}]^\top \in \mathbb{R}^3$ representa la posición del centro de rotación del vehículo, expresado en el marco de referencia inercial. ${}^{\mathcal{W}}\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{B}} = [\phi\ \theta\ \psi]^\top \in \mathbb{R}^3$ son los denominados ángulos de Tait-Bryan; $\boldsymbol{f_\xi} \in \mathbb{R}^3$ son los fuerzas aplicadas en cada eje; ℓ es la distancia entre el origen del sistema $\mathcal{B}$ y el eje de rotación de cada motor (se asume estructura simétrica); $\boldsymbol{\tau_\eta} \in \mathbb{R}^3$ son los pares generados como consecuencia del desequilibrio de fuerzas; m es la masa del helicóptero; g es el módulo de la aceleración de la gravedad; $\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ es la matriz de inercia; $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ es la matriz de Coriolis y $\boldsymbol{e_3} = [0\ 0\ 1]^\top \in \mathbb{R}^3$.

3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Siguiendo una descripción de tipo *top-bottom*, se dispone de tres elementos principales interconectados que componen la solución propuesta: máquina de estados, o diagrama de Stateflow; bloques de control e implementación del modelo dinámico de la plataforma (Figura 2).

3.1. DIAGRAMA STATEFLOW

El diagrama de Stateflow permite definir lógica de decisión compleja en el control de la plataforma de forma gráfica y estructurada, con el fin de simular la respuesta del sistema a entradas externas, eventos y condiciones temporales. En esta propuesta, existen dos elementos principales para el diseño: estados y transiciones.

Los estados representan modos de funcionamiento del sistema, que se ejecutan de forma exclusiva o en paralelo. En éstos se establecen valores para variables y se incluyen funciones relativas a la semántica de Stateflow, recurriendo a bloques externos que incluyen funciones de MATLAB o diagramas de Simulink. Se organizan de forma jerárquica y pueden relacionarse entre sí mediante transiciones, que incluyen algún tipo de restricción o condición y permiten gestionar el paso de un estado a otro.

3.1.1. Descripción de los estados

Si bien la definición de los diferentes estados no es única, a continuación se expone el conjunto mínimo de estados necesarios para recoger la lógica básica relativa a la evolución de un VTOL, tanto en tierra como en el aire (Figura 3).

Tierra

Considerado como el estado inicial. Se establece para comprobar y calibrar los distintos componentes del *quadrotor*, tales como GPS, enlace RC, sónar, barómetro, IMU, sensor de flujo óptico. etc. Si se realiza correctamente, el sistema estará listo para realizar una transición ante el evento "Volar" y conmutar al estado "Aire".

Aire

El estado "Aire"se define desde que la plataforma está disponible para iniciar el vuelo. A su vez se descompone de los siguientes subsistemas:

- **Despegue** El despegue es la fase siguiente al estado "Tierra", y se encarga de proporcionar referencias en altura para un despegue estable y coordinado de la plataforma, por lo que además establece a cero las referencias de orientación. Establece las condiciones de inicio y monitoriza los bloques de control rotacional y el control de altura.
- **Vuelo** En el modo "Vuelo"se establecen cuatro modos que se diferencian en las referencias proporcionadas a la plataforma y, por tanto, en el tipo de trayectorias a marcar como referencia. Cada uno de estos estados incluye una función de Simulink donde se obtienen las referencias incluidas como entradas externas.

  Modo 0. Estabilización

  Este modo proporciona referencias en posición y velocidades angulares, con el objetivo de mantener estable la plataforma en torno a unos valores fijos de los ángulos que definen la orientación. Se establece por defecto y además, se debe pasar por él en cualquier transición entre los otros tres estados, como se comentará más adelante en la sección (Sección 3.1.2).

  Modo 1. Estabilización en altura

  Similar al modo anterior en cuanto a la estabilización de la plataforma, pero añadiendo como grado de libertad adicional controlado la altura respecto al suelo. Permite el movimiento en la dirección vertical proporcionando un valor de referencia z_{ref}, que puede ser una constante o una variable proporcionada por un generador de trayectorias que proporcione la referencia. Este bloque también puede ser aplicable a los dos siguientes modos.

  Modo 2. Movimiento en el plano

  En el modo 2 se mantiene constante la referencia de altura a la que se encuentra en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

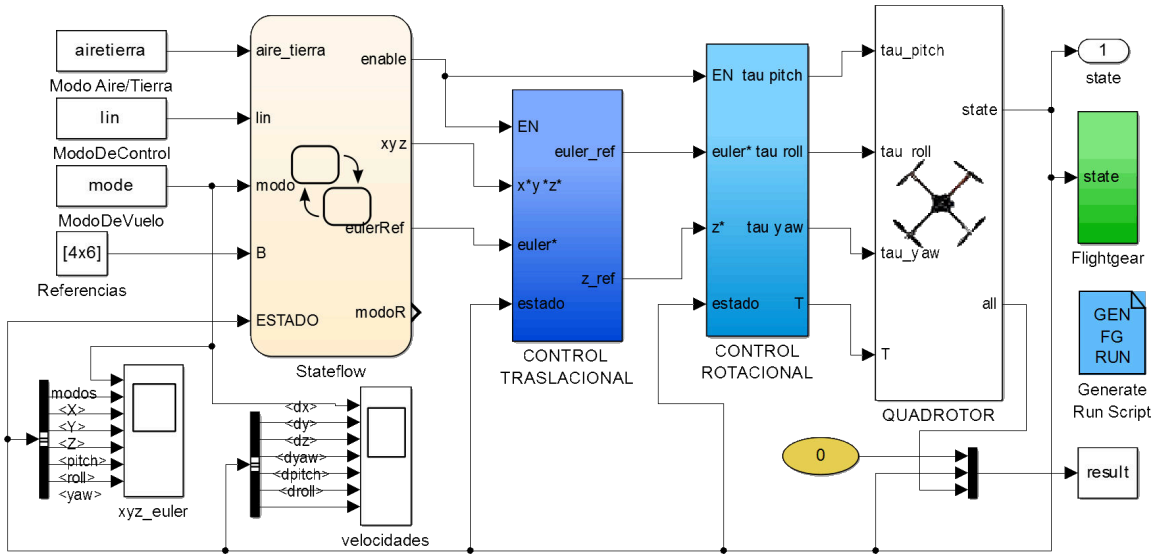


Figura 2: Modelo de la solución. Se representan bloque de Stateflow (izq); bloques de control (centro); y representación del modelo dinámico de la plataforma (dcha.)

ese instante y se proporciona una referencia en posición en el plano XY, bien constante o proporcionada por el generador de trayectorias. En este caso dicho sistema definiría una serie de *waypoints* que conformarían la trayectoria deseada. Este bloque permite incluir algoritmos de planificación de caminos que expanden las utilidades de la plataforma al aumentar su nivel de autonomía.

Modo 3. Movimiento en XYZ

En el último modo son proporcionadas referencias para los 6 grados de libertad de la plataforma, permitiendo un movimiento libre en el espacio tridimensional. Conserva las características del modo 2 pero añade la posibilidad de variar referencias en altura. Monitoriza y gestiona tanto los bloques de control rotacional como del control traslacional.

3.1.2. Transiciones

- **Tierra - Aire**

  Esta transición verifica la comunicación con la estación base, estado de sensores, voltaje de baterías y enlace RC con la emisora, confirmando así que todos los componentes están operativos y la plataforma está lista para volar de forma segura.

- **Despegue - Vuelo**

  Tiene como objetivo confirmar que el *quadrotor* ha despegado y se encuentra estable, comprobando que la altura es la de referencia establecida para este modo, y así poder iniciar el estado Vuelo.

- **Transición entre modos de vuelo**

  El modo de vuelo es una variable externa introducida por el usuario y puede tomar valores consecutivos del 0 al 3. Aunque los cuatro modos de vuelo son independientes y tienen su propia lógica, para cambiar entre sí los modos "1", "2" y "3" es necesario pasar primero por el estado "0" de "Estabilización", con el fin de garantizar una transición segura en tiempo finito. Una vez verificada la estabilidad, se proceden a comprobar en cada caso los siguientes parámetros mediante una función denominada "*ok*", que realiza las siguientes actuaciones según el tipo de control seleccionado:

  1. Control en altura. Se debe comprobar la veracidad de los valores del sónar, así como el margen entre la altura de referencia y la altura actual, para comprobar que es un movimiento realizable y seguro.
  2. Control en posición. Deben verificarse la cobertura GPS, así como los valores de referencia deseados y elaborar unos valores de transición entre el estado y la referencia para suavizar la trayectoria, en tiempo finito.

  El tipo de control en cada caso es el siguiente:

  - Transición $0 \rightarrow 1$: Control en altura.
  - Transición $0 \rightarrow 2$: Control en posición.
  - Transición $0 \rightarrow 3$: Control en altura y en posición.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.2. Modelo dinámico

El bloque denominado *Quadrotor* en la figura (Figura 2) recoge la implementación del modelo dinámico de la plataforma presentada en la sección (Sección 2). La entrada al sistema, proporcionada por el bloque de control, se corresponderá con los pares de actuación ($\boldsymbol{\tau}_a$):

$$\boldsymbol{\tau}_a = \begin{bmatrix} \tau_{\phi_a} \\ \tau_{\theta_a} \\ \tau_{\psi_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell f_2 - \ell f_4 \\ \ell f_3 - \ell f_1 \\ \kappa((f_1 + f_3) - (f_2 + f_4)) \end{bmatrix} \tag{3}$$

y el empuje total deseado, calculado como:

$$\mathrm{T} = \sum f_i, \quad i = 1 \ldots 4 \tag{4}$$

donde κ recoge diferentes parámetros dependientes del motor y rotor seleccionados. Estas entradas son direccionadas al bloque denominado "*Control Mixer*", encargado de convertir estos pares y empuje total en velocidades de giro de los rotores. La aplicación de éstos provocará la evolución del vector de estados representado como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathrm{x} & \mathrm{y} & \mathrm{z} & \phi & \theta & \psi & \dot{\mathrm{x}} & \dot{\mathrm{y}} & \dot{\mathrm{z}} & \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Adicionalmente, pueden añadirse modelos de perturbaciones externas, tales como viento o efecto suelo, mediante bloques propios que incluyan el modelado de estos efectos, o los propios del Aerospace Toolbox.

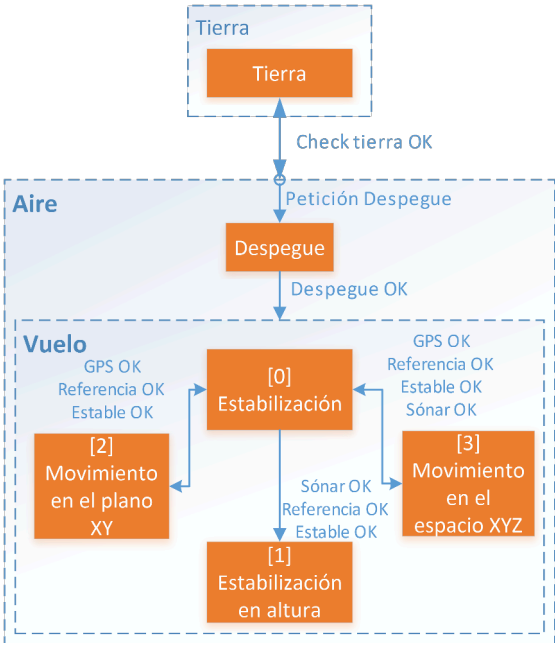


Figura 3: Representación del diagrama principal de estados Stateflow y transiciones.

3.3. CONTROL

El conjunto de bloques relativos al control están gobernados por la máquina de estados y proporcionan las señales de actuación a la plataforma para lograr las referencias deseadas. Si bien es un elemento clave en el diseño de la solución global, para un primer desarrollo se ha optado por reutilizar controladores para plataformas de tipo VTOL disponibles en [6]. Consisten básicamente en controladores lineales en posición y velocidad (lineales y angulares), tanto para estabilización como para traslación. Para un mayor detalle sobre la implementación de las leyes de control, se refiere al lector a la referencia indicada.

Típicamente, debido a la dinámica de los subsistemas que conforman el modelo de este tipo de plataformas (Sección 2), la tarea del control se descompone en control rotacional y control longitudinal [4][5][15] (alternativamente de estabilización y traslación). Bajo estas premisas, el modelo presentado en la figura (Figura 2) presenta esta descomposición, lo que permite implementar una lógica de gobierno de los diferentes bloques de control:

- En función del modo de vuelo actual del sistema, la máquina de estados habilitará o no (señal ENABLED) diferentes subsistemas. Por ejemplo, si el modo de vuelo establecido es "Estabilización", el subsistema de control traslacional será deshabilitado hasta nueva conmutación.
- La interfaz que presentan los bloques de control, tanto al diagrama de estados como al modelo dinámico, es similar, independientemente de las leyes que estén ejecutando (lineales, no lineales, por ejemplo). Esto permite la adición de nuevos bloques de control, sin modificar el diseño global (tan sólo el subsistema al que afecte), para ser evaluados y verificados. Este detalle se puede observar en la figura (Figura 4). Pueden añadirse tantos modos de control como se quiera, teniéndolos en cuenta en la lógica de Stateflow.
- Uno de los objetivos del diseño inicial era poder permitir una conmutación en "caliente" entre las diferentes leyes de control. Tanto el usuario como el sistema, pueden, en cualquier momento y si el sistema lo cree conveniente, poder conmutar entre leyes de estabilización o traslación.

El bloque de control traslacional (Figuras 2,4) toma como referencia la posición (${}^{\mathcal{W}}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}{}^{ref}$) y proporciona las referencias al control rotacional. Los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

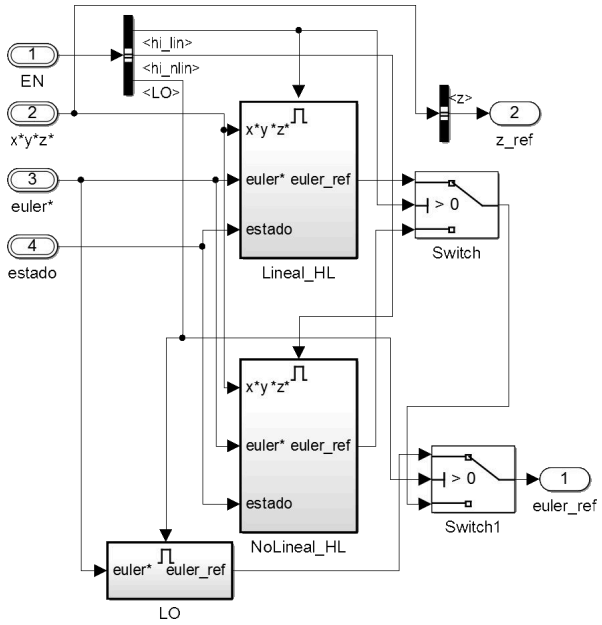


Figura 4: Subsistema de control traslacional. Se observa el detalle de la señal ENABLE para poder simular la habilitación de diferentes leyes de control en "caliente".

modos de vuelo que utilizan este tipo de control son el de "Movimiento en el plano" y "Movimiento en XYZ".

En el caso del control rotacional, se tiene como entrada la posición angular de referencia (proporcionada por el bloque de control traslacional o por el propio modo de vuelo en el bloque de Stateflow) y se obtienen como salida los pares correspondientes a cada ángulo para realizar el movimiento.

4. SIMULACIÓN

El objetivo principal de este trabajo era desarrollar una solución para poder simular los diferentes estados lógicos por los que puede pasar el *quadrotor*, de manera segura. Los resultados de simulación permiten evaluar diferentes aspectos de la solución propuesta: evaluación de las leyes de control, comportamiento ante perturbaciones, conmutación entre diferentes estados, etc.

4.1. RESULTADOS INICIALES

El hecho de utilizar Simulink permite un análisis inmediato de los resultados de simulación mediante gráficas. A continuación se muestran algunos de los resultados más interesantes. En la figura (Figura 5), puede observarse la evolución temporal de los valores correspondientes de posición lineal y posición angular, y ser comparados con el modo de vuelo. La gráfica se ha obtenido a partir de una simulación de $t_{sim} = 40s$, donde:

Modo 0: Intervalo de simulación: [0-10]s. Modo de vuelo "Estabilización": Referencias en posición y orientación a 0: ${}^{w}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = \mathbf{0}_{1x3}$ (m), ${}^{w}\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = \mathbf{0}_{1x3}$. El objetivo es mantener fijo el *quadrotor* en la posición final que alcanza después del despegue.

Modo 1: Intervalo de simulación: [10-20]s. Modo de vuelo "Estabilización en altura": Referencias en posición ${}^{w}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = [0\ 0\ 8]^{\top}$ (m), y orientación ${}^{w}\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = [0\ 0\ 0]^{\top}$. Se proporciona una referencia fija en altura manteniendo la posición XY.

Modo 2: Intervalo de simulación: [20-30]s. Modo de vuelo "Movimiento en el plano XY": Las referencias en posición se establecen como ${}^{w}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = [-1{,}5\ -1{,}5\ \ z]^{\top}$ (m). Se conserva la altura del intervalo anterior y se proporciona una referencia para que la plataforma vuele en el plano.

Modo 3: Intervalo de simulación: [30-40]s. Modo de vuelo "Movimiento en el espacio XYZ": Referencias en posición ${}^{w}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}{}^{ref} = [1{,}5\ 1{,}5\ \ 4]^{\top}$ (m). La plataforma realiza una trayectoria 3D hacia un punto fijo de referencia.

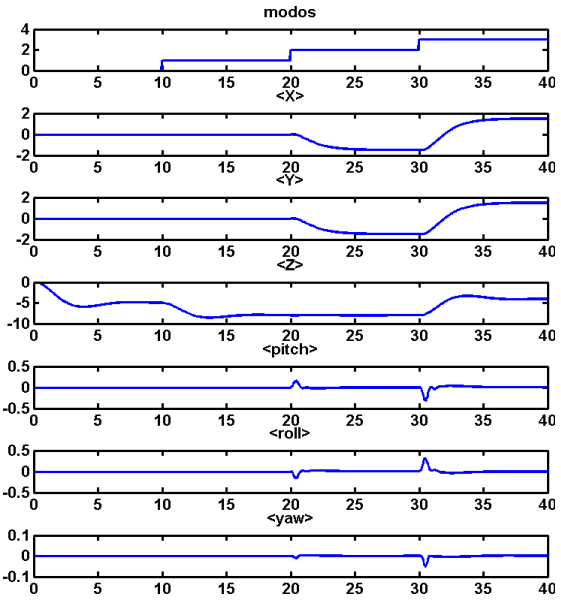


Figura 5: Evolución temporal de las variables "Modo", posición lineal y posición angular durante una simulación

4.2. FLIGHTGEAR

FlightGear [8] es un simulador de vuelo, de código abierto, que permite visualizar el vector de estado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de la plataforma de una forma gráfica gracias a sus múltiples opciones de conexión con otro software. En este caso, se dispone del bloque "*FlightGear Preconfigured 6DoF Animation*" del Toolbox Aerospace Simulink, cuyas entradas son longitud, latitud, altitud, y posición angular (pitch, roll y yaw) (Figura 6(a)).

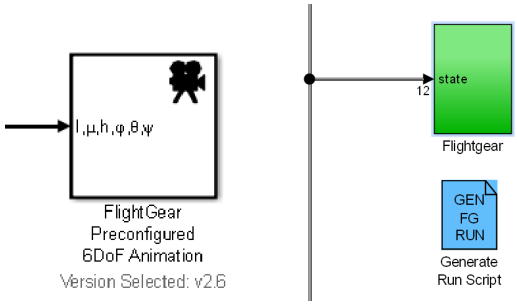


Figura 6: FlightGear (a) Diagrama de conexionado necesario para visualización de resultados en el simulador, y (b) Esquema de conexión con la salida del sistema.

FlightGear dispone de una gran variedad de modelos de aeronaves, tanto de ala fija como rotatoria, sin embargo no se ha encontrado un modelo nativo de *quadrotor*, por lo que se ha optado por disponer de un modelo de helicóptero que ilustra de forma similar la dinámica de éste (Figura 7).

Figura 7: Ejemplo de visualización de la evolución de la plataforma con FlightGear.

Para realizar la conexión de FlightGear y Simulink, es necesario colocar en el modelo un bloque denominado "*Generate Run Script*" (Figura 6(b)). Al abrir FlightGear y ejecutar este script, se sincronizan los datos de conexión por red y permite generar un archivo con extensión **.bat* que servirá de ejecutable para el FlightGear con las condiciones y parámetros iniciales que se hayan indicado en el script [9].

5. DESCRIPCIÓN HARDWARE

5.1. PLATAFORMA HW

La plataforma hardware utilizada durante el desarrollo de este trabajo está basada en la solución Arducopter [2]. Más concretamente, la versión utilizada es la denominada APM 2.5, la cual contiene en una misma placa PCB tanto el microprocesador como todos los sensores relativos a la IMU (Inertial Measurement Unit) o unidad de medida inercial, y externo a la placa proporciona la antena receptora de señal GPS modelo uBlox LEA-6H y el magnetómetro. Para medir la altura respecto al suelo se utiliza un sónar modelo MB1200.

Salvo pequeñas modificaciones, el software embebido proporciona el conjunto de medidas necesarias para la realimentación sensorial (${}^{\mathcal{W}}\boldsymbol{\eta}_{\mathcal{B}}$) y permite el cierre del lazo de control de estabilización a 100 Hz. Para la obtención de los datos necesarios para el cierre del lazo de posición (${}^{\mathcal{W}}\boldsymbol{\xi}_{\mathcal{B}}$), se utilizan en combinación el sensor GPS, sensor de flujo óptico y opcionalmente una cámara. En éste último, es necesario además la inclusión de una placa de hardware más potente que permita el procesamiento de información visual.

Los motores empleados son típicos *brushless*, modelo *T-Motor MT4006* de 740 RPM, los cuales, en función del número de celdas de la batería y la configuración del rotor, proporcionarán un empuje determinado. El control de estos motores se realiza mediante variadores de frecuencia (*ESC-Electronic Speed Controller*) de hasta 30 A, del fabricante *T-Motor*, que implementan un control de velocidad a bajo nivel y permiten envío de referencia desde la placa de control a 400 Hz.

A nivel de comunicaciones, se dispone de un enlace de telemetría de 433 Mhz del fabricante *3DRobotics*, el cual permite el envío periódico de las diferentes variables necesarias para una monitorización permanente. Adicionalmente, se dispone de una emisora para conmutar entre los diferentes modos de vuelo, implementados en la máquina de estados, y para proporcionar referencias en función del controlador activo en cada momento.

5.2. INTEGRACIÓN

Una vez validada la solución en Stateflow, se presenta como objetivo final y parte fundamental del proyecto su integración con el hardware real Arduino descrito anteriormente. Adicionalmente, se desea que el trabajo propuesto sirva tanto de herramienta para investigación como para docencia, especialmente en asignaturas relacionadas con el modelado de sistemas físicos y de Control automático.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El hecho de que se haya probado en simulación previa a su implementación permite ahorrar tiempo de desarrollo, ya que las pruebas pueden hacerse en un ordenador, y no es necesaria la disponibilidad de la plataforma hasta el momento de la integración. Para ello, se considerará como principal herramienta el Toolbox Real-Time Workshop®, que genera y ejecuta código C/C++ exportado de Simulink, Stateflow y las funciones del diseño, incluso para aplicaciones en tiempo real. Para programar la placa de control, existen dos opciones: bien desde el propio entorno de MATLAB, o bien importando el código anteriormente generado en el *workspace* del IDE genérico de Arduino [3] e integrando las diferentes funciones exportadas en el ejecutable principal.

Es importante destacar que esta propuesta es compatible con otras plataformas VTOL. El procedimiento a seguir, para utilizar la propuesta actual en hardware de control diferente al planteado y otro modelo dinámico sería:

- Sustitución del modelo dinámico correspondiente a otro tipo de plataforma VTOL.
- Configurar adecuadamente las opciones de exportación de código embebido en el Toolbox Real-Time Workshop® para la placa de control destino específica.

De manera opcional, es posible además verificar el correcto funcionamiento del hardware destino del código exportado. Es lo que se conoce como *"Hardware-in-the-loop"*, y para el caso específico de la plataforma Arducopter, existen librerías (bloques "*S-Function*") fácilmente importables al entorno de desarrollo [10].

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha presentado el diseño de una máquina basada en MATLAB Stateflow para la verificación y validación del software de control para un equipo robótico aéreo y su integración con plataformas embebidas de tiempo real. Este trabajo es una muestra de las múltiples opciones que dicha herramienta permite a la hora de introducir lógica de control en una plataforma de tipo *quadrotor*, aunque podría extenderse a otras configuraciones. Se han puesto de manifiesto las ventajas de utilizar la simulación a la hora de desarrollar un proyecto de este tipo y la relativa simplicidad a la hora de añadir nuevos bloques que permitan aumentar las funciones del sistema, como por ejemplo, añadir distintas leyes de control y poder elegir en tiempo real cuál es más conveniente usar, o incluso añadir nuevas extensiones a la plataforma, como el control de un brazo manipulador externo, un giro-estabilizador para cámaras o cualquier otro bloque de control de carga, por ejemplo. Una vez finalizado el desarrollo del proyecto se desea poder promover la utilización de esta librería para entornos académicos bajo libre disposición.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) por la financiación de este trabajo, a través de los proyectos DPI2012-37580-C02-02 y DPI2013-44135-R. Del mismo modo, expresar nuestra mayor gratitud a Antonio Ventosa Cutillas por su inestimable colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

[1] Asociación española de sistemas de vuelo pilotados de forma remota. http://www.aerpas.es/

[2] Plataforma Arducopter. http://copter.ardupilot.com/

[3] Plataforma Arduino. http://www.arduino.cc/

[4] Bouabdallah, S., Murrieri, P., y Siegwart, R., (2004) Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor. En Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Automat., volume 5, pp 4393–4398, New Orleans, USA.

[5] Castillo, P., Lozano R., y Dzul, A.E., (2005) Modelling and Control of Mini-Flying Machines, Springer.

[6] Corke, P., (2011) Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB®, Springer. http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html

[7] Escareno, J., Rakotondrabe, M., Flores, G., y Lozano, R., (2013) Rotorcraft MAV having an onboard manipulator: longitudinal modeling and robust control, in European Control Conference (ECC). Zürich, Switzerland, pp 267-269.

[8] FlightGear flight simulator web page. Recurso electrónico. http://www.flightgear.org/

[9] Conexión Flightgear con Simulink. Recurso electrónico. http://www.mathworks.es/es/help/aeroblks/working-with-the-flight-simulator-interface.html#f3-19707

[10] Hartley, W., (2012) APM2 Simulink Blockset. http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39037-apm2-simulink-blockset.

[11] Lee, D., Chitrakaran, V., Burg, T., Dawson, D., y Xian, B., (2007) Control of a remotely operated quadrotor aerial vehicle and camera unit using a fly-the-camera perspective, in 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp 6412-6417.

[12] Markosian, L.Z., Mansouri-Samani, M., Mehlitz, P.C., y Pressburger, T., (2007) Program Model Checking Using Design-for-Verification: NASA Flight Software Case Study, Aerospace Conference, 2007 IEEE , vol.1, no.9, pp 3-10.

[13] Parra-Vega, V., Sanchez, A., y Izaguirre, C., (2012) Toward force control of a quadrotor UAV in SE(3), on IEEE 51st Annual Conference Decision and Control (CDC), pp 1802-1809.

[14] PVS Specification and Verification System. http://pvs.csl.sri.com/

[15] Raffo, G.V., (2011) Robust Control Strategies for a quadrotor helicopter. An underactuated mechanical system. Ph.D.Thesis, Engineering School. University of Seville.

[16] Mathworks MATLAB Stateflow®. http://www.mathworks.es/products/stateflow/

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

SENSORY PROCESSING OPTIMIZATION IN A SMART DEVICE

Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Raul Simarro
Institute of Control Systems and Industrial Computing
Polytechnic City of Innovation
Polytechnic University of Valencia, Spain
{jojigar1}@inf.upv.es, {jopolu;emunera;jposadas;rausifer}@ai2.upv.es

Abstract

In a distributed control system, where client nodes receive data from distributed sensors in other nodes, it might happen that the same operation about data from a sensor is replicated in different nodes. For that reason, being able to do pre-processing of sensory data in the source node, allows optimizing the client nodes resources. In case of distributing sensory data using services, the sensors that allow that pre-processing are known as smart devices. This article shows a smart device as part of a distributed system that allows to optimize resources in the client nodes. The smart device presented in this is based in a Red, Green, Blue, Depth (RGB-D) sensor. To manage the different acquisitions of the RGB-D it is used a organized processes structure (called plugins) in a topology. The interface of that topology of plugins is named Smart Plugin Topology (SPT) and allows creating plugin combinations, which provides the smart sensor with the ability of doing suitable pre-processing for each client, optimizing the server and local resources of the smart sensor.

Key words: Smart sensor, plugin, built-in system, distributed system.

1 INTRODUCTION

Nowadays, distributed systems based on smart built-in systems are becoming more frequent. They are found in a wide range of systems like: robots, vehicles or video security systems. Each one of them systems uses different sensors in order to complete from easy tasks to complex quests. By a smart sensor, the various functionalities of the sensors may be centralized in order to simplify the client tasks in a distributed system.

Among smart sensors, standing out are Red,Green,Blue (RGB) cameras that have improved in order to be capable of obtaining the depth. These cameras are known as RGB-D. There are various models like xTion [2], Kinect [13] o Senz3D [5], each one of which has specific features: definition, capture distance, price, capture rate and others. Regardless of the choosen model, it is possible of pre-processing the data in order to offer more features to clients. For example, detecting objects with specific color and in a concrete distance. If the distributed system contains more than one client interested in the same data, it is convinient that the smart sensor offers a service to every client interested in that data. In that case, the smart sensor would behave as a smart device.

In this article is introduced a smart device that allows to process and distribute the sensor's data. The smart device shown works by mean of three stages: an initial phase of acquisition, a posterior phase of processing and a final sending phase. In order to complete the intermediate data processing stage, it is necessary to execute various specific processes, called as plugins. What is more, plugins must have capacity of organizing among them, due to the data of one of them being (possibly) relevant to others. For example, a plugin may detect a shape and other plugin might detect color. By composition between both plugins it would be had a third one that would detect objects with the shape of the first plugin and the color of the second one. The structure within the plugins are organized, has been called Smart Plugin Topology SPT. The main objective of the SPT is to manage efficiently the processing stage in order to avoid producing duplicities or an inappropriate use of the system resources. Due to the smart device having SPT, not only the number of devices used is reduced, but it also less computational and energetic cost, and, saves the resources used. Plugins use communication processes to distribute their results. These communications should follow the correspondent requirements of quality of service parameters (QoS), as time, latency, jitter and others.

The article is organized as follows: section 2 contains the information related to implementation. Section 3 shows implementation details of the SPT. Section 4 includes results obtained by the execution of different compound plugins. And last, in section 5, future work of the project and conclusions reached.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

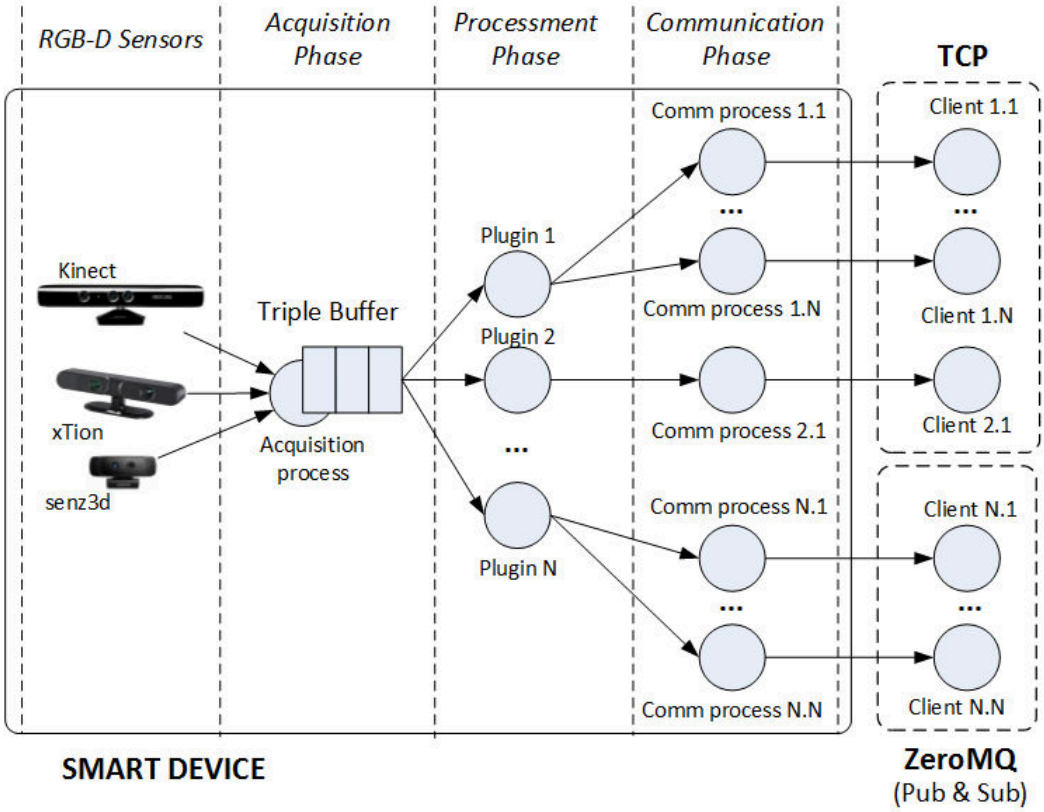


Figure 1: Components and pashes inside the smart device.

2 SMART DEVICE

2.1 SYSTEM DESCRIPTION

The smart device implementation is made by means of the inclusion of an RGB-D sensor, model xTION, for the capture of the pictures, and also a Raspberry PI (RPI) [13] in order to integrate the acquisition, processing and communication stages. To acquire the pictures, it is used the OpenNI v2 [7] API to do the different settings of the device. The acquisition stage is optimized by using a variation of the triple buffer algorithm [9] that allows to improve the obtaining of an only RGB-D sensor when various consumers need the data. In order to make easy the plugins programming, OpenCV v2.4.8 [4] API functions are used. Each plugin sends its result to the consumers, limiting the number of connections that guarantees the QoS of the clients. These consumers might acces to plugins establishing a TCP [12] connection or being subscribers by the use of a Publisher-Subscriber (PUB-SUB) ZeroMQ [8] pattern. These features are shown in Figure 1.

Plugin	Description
Color	Provides RGB image or transformation to BGR.
Gray	Provides the image, but in gray scale.
Contour	Recognizes outlines in the image given by the smart sensor.
Resize	Resizes the image to a specific size.
Soften image	Ereases imprefection like, for example, excesive bright or reflections.
Motion Detection	Detects moving objects.
Color detection	Allows to detect pixels of an specific color.
Gray Depth	Represents a depth matrix in grey scale.
Depth	Distances matrix of the image.
Binary Depth	Provides a binary matrix where 1, represents the existence of an object in the sight range.
Closest Farthest Point	Provides the nearest and furthest object in the sight range.

Table 1: Plugins topology first order

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

The plugins within Table 1, offer information of the smart sensor with a variable processing level. For example, Color plugin supplies the raw picture or changing the channels, Grey plugin transform from three channels to just one, what entails more processing. Some plugins, like Contour and Motion, need an advanced processing.

2.2 SPT DESCRIPTION

The plugins may be combined between them to generate dynamically new plugins and, then, being able to design specific plugins with the clients requirements. In Figure 2, it is shown the design pattern based in the Composite pattern [10][6] used to join plugins.

The purpose of this pattern consists in making up objects in a tree structure, allowing the different client nodes to deal with first and second order plugins equaly. In this specific case, the first order plugin role is done by different plugins of the SPT and the second order plugin role is the result of merging other first order plugins and producing second order plugins.

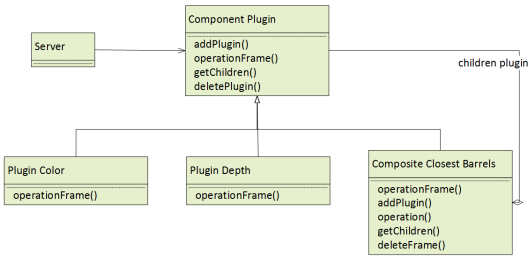


Figure 2: Pattern Composite

The SPT needs a structure that supports the wide plugins variety of the smart device. Besides, the SPT must provide operations that allow using various plugins to join data from the smart sensor and generate enriched information.

3 PLUGIN DESCRIPTION

3.1 COMPONENTS

In this sub-section, it is shown an example of the plugin usage and its organization in the SPT. The example lies in the detection of objects of an specified shape and color, that, besides, is at a certain distance. To do so, various plugins are needed, shown in Figure 3. This case is about a client that is trying to detect circular and red objects that are less than 5 metres far. To attend this petition, the compound of various plugins are needed: one to detect shape (Figure), other to dectect objects at less than 5 meters long (BinaryDepth) and other that detects red objects (ColorDetection). The Figure and ColorDetection plugins need information provided by RGB Plugin, while BinaryDepth plugin needs information provided by Depth plugin. A client requests a second order plugin. The server is using two basic plugins, color and depth. The server establishes a connection with the client and is in charche of creating new plugins in case of not having them (Regardless of the plugin being first or second order). It also will manage intern acquisitions, in order to provide a compound of various plugins. That is, doing pertinent connections between plugins. In the Figure 3 example, the Color and Depth plugins are already created and working. To satisfy the needs of the client, three plugins are needed: Figure, RGB and Depth.

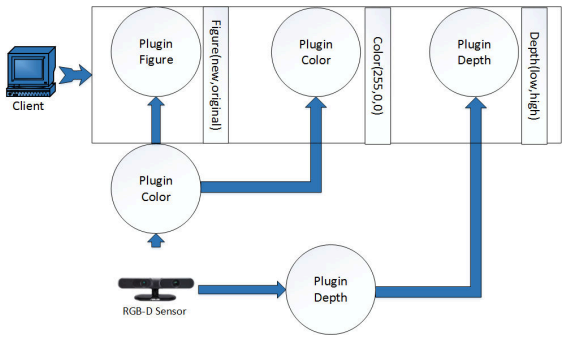


Figure 3: Example of use.

3.2 COMMUNICATIONS

In order to allow the client to inform the smart device about the requirements, a request message is needed. The message header contains information regarding fields size, state and other values. Besides, when a compound plugin petition is done, message header also contains an information addition that can be seen in Figure 4, where it is established the size of the constant concerning to the number of depth plugins family, followed by, and using the same procedure, the color plugins family. This modification causes two header types, a basic one and a larger one, to allow the different plugins representation.

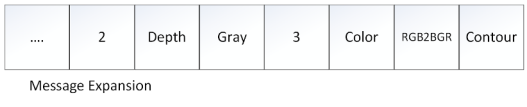


Figure 4: Second order header plugin.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

3.3 USING PLUGINS

It is necessary that the plugins will be created dynamically on account of the smart sensor do not know neither when nor what kind of plugin the consumer will require. Two algorithms are executed in the main system thread: Algorithm 1, that creates a plugin, Algorithm 2, that shows the work of a plugin and Algoritm 3, that destroys a plugin.

Algorithm 1, each time a connection regarding the generation of a new plugin is established. In first place it will format the message, distributing the different parts of the information between the specific system variables. One of the most important variables generated by this operation is the buffer id that stores various identifiers of client requested plugins (2). There is one sure thing regardless of the type of the message (basic or extended), the first buffer position will delimit just one plugin, so verifying its existence (3)(13)(14). In case of it not existing, the request type (basic or compound) must be determined using the basic message size (4). Leafs (7) or compounds are generated, the second ones by adding leafs to the inner structure (8)(9). In last place, regardless of the chosen path in the algorithm, the connection must be attached to a plugin (15).

Algorithm 1 Algorithm for creating a Plugin

Require: At least one connection and a valid message.

Ensure: Retrieves the state of the system and waits for a new connection.

1: $Connect() \leftarrow Menssage$
2: $SplitMessage() \leftarrow id$
3: **if** $!Exist(id[0]) \leftarrow boolean$ **then**
4: **if** $!sizeOf(Mensaje) = 16 \leftarrow boolean$ **then**
5: $CreatePlugin(id[0]) \leftarrow Plugin$
6: **else**
7: $CreatePComposite(id[0]) \leftarrow Plugin$
8: **for** $i = 1, sizeOf(id)$ **do**
9: $Plugin.Add(CreatePlugin(id[i]))$
10: **end for**
11: **end if**
12: **else**
13: $Plugin.SearchPlugin(id[0]) \leftarrow Plugin$
14: **end if**
15: $Plugin.AddConnect()$

In the Algorithm 2, a node may request a second order plugin by the extended message format. The compound plugin has an elements list, represented in the algorithm as ListPlugin, and a constant, PDepth, that represents the number of plugins inside the list that are part of the depth processing family. The objective is, by a FDOrigen and a FCOrigen, to apply various processings to make the most of the code and memory, by the use of plugins that might already be in execution serving other nodes. The common calculation of all plugins is getFrame(), which receives the buffer where receive and write information. In lines (1)(2) apply depth pre-processing family and in lines (3)(4) pre-processing of color family. In last place, the operation (7) method does the calculation regarding that compound plugin, that is translated to a final frame, and with the result as desired by the client.

Algorithm 2 Algorithm work of a Plugin

Require: Application plugin with a set order.

Ensure: If the compound plugin not exist it is created according to the algorithm 1.

1: **for** $i = 0, (Size() - PDepth)$ **do**
2: $ListPlugin.getPlugin().getFrame(FDDest)$
3: **end for**
4: **for** $i = (Size() - PDepth), ListPlugins.size()$ **do**
5: $ListPlugin.getPlugin().getFrame(FCDest)$
6: **end for**
7: $Operation(FDDest, FCDest) \leftarrow Frame$

A destruction plugin algorithm method due to a plugin keep consuming resources in a unnecessary manner, because it doesn't have associated connections. The Algorithm 3 is a method that is executed periodically to verify the state of the connections associated to a plugin. The algorithm consists in a nested loop. The outer loop (1) has the task to check all the plugins using the an auxiliar variable (2). The counter variables to use the loops are located on lines (5) and (13). For each plugin returned in the outer loop iteration, the inner loop has the task to check all the connections (4). It is verified on line (6) the conection state. Since a client can unlink to the plugin by itself or conection problems can happen and to lose the conection. If the conection doesn't reach the minimum conection state (6) (7), in example high latency on the conection or the packets don't arrive to the destination, the conection associated to the plugin is deleted. Finally, once all connections associated to the plugin are checked, it is verified if the plugin has still some associated connection. If there aren't connections associated to the plugin, it is eliminated in such a way it doesn't consume extra resources (10) (11).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Algorithm 3 Algorithm Destruccion de un Plugin

Require: Exist at least a available plugin.
Ensure: In case the plugin doesn't attend the connections it is eliminated with the algorithm.

```
1: for i = 0, getTallaPlugins() do
2:   auxPlugin = getPlugins() ← Plugins
3:   for j = 0, getTallaConnects do
4:     auxConnect = Plugin.getConnect(i) ← Connect
5:     j+ = 1
6:     if !auxConnect.getStatus() ← bool then
7:       auxConnect.Delete()
8:     end if
9:   end for
10:  if Plugin.getTallaConnects() ← int, 0 then
11:    Plugin.Delete()
12:  end if
13:  i+ = 1
14: end for
```

4 CASE STUDY

This section starts with a plugin composition example, to obtain as final result a fusion between a depth matrix and a color matrix, both preprocessed with the format seen. The message used was depth family (depth-gray) and color family (color) so the plugins list size would be three, being the two first the depth family and the last one the color. The composed code is different from the rest compositions by the inner re-definition of the operation method. In this case, the method stills receiving a depth frame and a color frame and stills returning the destination frame, but, internally, it will apply:

$$FrameDest = FCDest * \alpha + FCDest * \beta + \gamma \quad (1)$$

$$FrameDest = saturate(FrameDest) \quad (2)$$

Where FDDest and FCDest are the frames corresponding to the pre-processing application, alpha and beta are constants corresponding to weights of both matrixes and gamma is the scale applied to the fusion. As it can be seen in Figure 5, the result of applying frame fusion with just a few code lines of a method and re-using code by using code from different plugins.

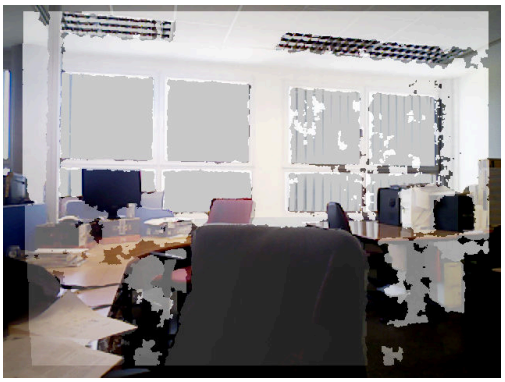


Figure 5: Resultant image from the color and depth plugin fusion.

In Figure 6 can be seen another plugin composition but, in this case, the compound is zeta family (depth) and color family (color - color detection). The result of this composition to follow the red and nearest object and draw its trajectory, the client will receive the result frame of this compound. As it was said, it would be necessary to re-define just the operation method.

$$FrameDest = draw(min(FDDest, FCDest)) \quad (3)$$

In the FDDest frame distances are from the camera and in FCDest are drawn just red objects. Consequently, the min function just have to figure out which is the nearest object by FCDest matrix, when the draw function has calculated the center, it draws a red point and stores it in an array in order to do the sequence. The result is a picture where it can be seen a points sequence that represents the trajectory of that object.

Figure 6: Color Detection.

5 CONCLUSIONS

Finally, as conclusion, in this work the development of a smart sensor aiming to improve and optimize the sensor data flow in a distributed

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

embedded system with limited resources has been detailed. For achieving that goal, is presented the development of a smart sensor endowed with a RGB-D camera as its main sensor device. Next, it has been also described the three main operation phases of any smart resource: acquisition, data process, and sending.

Main contribution of this work is focused on the description of the implemented data processing mechanisms known as SPT which provides resources optimizations and avoids redundant information. The creation, configuration and usage of plugins in a SPT is carefully detailed and its performance has been tested through the presented experiments.

As a future work, it will be studied the benefits and improvements of the addition of smart resources as a part of a real time control system which implements the Control Kernel Middleware (CKM), just as is described in [1]. It also will be evaluated how this devices could enhance the execution of robot oriented CKM tasks just as the behaviour management of the navigation system [11].

Acknowledgment

Coordinated project COBAMI: Mission-based Hierarchical Control. Education and Science Department, Spanish Government. CICYT: MICINN: DPI2011-28507-C02-01/02 and the "Real time distributed control systems" of the Support Program for Research and Development (PAID-06-12) Research Vice-Chancellor of the Polytechnic University of Valencia (SP20120834)

References

[1] Albertos, P., Crespo, A., Simó, J. (2006) "Control kernel", *A key concept in embedded control systems*, In 4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems.

[2] ASUS, Xtion PRO. Live. URL [$http://http://www.asus.co.jp/Xtion_PRO_LIVE/$].

[3] Borenstein, Greg. Making Things See: 3D vision with Kinect, Processing, Arduino, and MakerBot. " O'Reilly Media, Inc.", 2012. MLA

[4] Bradski, Gary; Kaehler, Adrian. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. " O'Reilly Media, Inc.", 2008.

[5] Creative, creative senz3d. URL [$http://support.creative.com/welcome.aspx$].

[6] Erich Gamma,Richard Helm, Ralph Johnson, Jhon vlissides (2006) "Patrones de Diseño", pp 151-168.

[7] Falahati, Soroush. OpenNI Cookbook. Packt Publishing Ltd, 2013.

[8] Hintjens, Pieter. ZeroMQ: Messaging for Many Applications. O'Reilly Media, Inc., 2013.

[9] Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yagüe, David Baselga-Masia, José-Enrique Simó-Ten (2014) "Distribution of Information from a Smart Sensor", *Performance and Results of the Triple Buffering Built-In in a Raspberry PI to Optimize the Distribution of Information from a Smart Sensor*, Distributed Computing and Artificial Intelligence, 11th International Conference, pp 279-286

[10] Judith bishop, (2007) "C# 3.0 Design Patterns", *Design Patterns to Solve Real-World Problems*, pp 49-61.

[11] Munera Sánchez, Eduardo and Muñoz Alcobendas, Manuel and Posadas Yagüe, Juan L and Poza-Luján, Jose-Luis and Blanes Noguera, J Francisco (2014) "Navigation on a Control Kernel", *Integration of Mobile Robot Navigation on a Control Kernel Middleware Based System*, Distributed Computing and Artificial Intelligence, 11th International Conference, pp 477-484

[12] Peterson , Larry L.; Davie, Bruce S. Computer networks: a systems approach. Elsevier, 2007.

[13] Upton, Eben; Halfacree, Gareth. Raspberry Pi user guide. John Wiley and Sons, 2013

[14] Webb, Jarrett; Ashley, James. Beginning Kinect Programming with the Microsoft Kinect SDK. Apress, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CABEZA MECATRÓNICA CON INTELIGENCIA EMOCIONAL Y ARTIFICIAL

Sheila Lucero Sánchez López
sheila_lucero_sanchez@hotmail.com

Eduardo Zalama, Jaime Gómez García-Bermejo
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid, ezalama@eii.uva.es, jaigom@eii.uva.es

Resumen

El notable aumento en la demanda de robots de servicio genera un requerimiento superior de una mejor interacción hombre – máquina. La comunicación humana en su mayoría se realiza a través de expresiones corporales y faciales, por tal motivo, es necesario que el robot adquiera este tipo de comunicación no verbal para mejorar la interacción y aumentar el grado de realismo.

El presente artículo describe la dotación de inteligencia emocional y artificial de una cabeza mecatrónica realista con alta capacidad gestual y apariencia de un hombre de la tercera edad. Se explica la estructura de programación SMACH que soporta un comportamiento robusto y la integración de un sistema de reconocimiento facial.

Palabras Clave: Interacción hombre-máquina, robótica social, Estructura SMACH, reconocimiento facial

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología está adentrándose en todos los aspectos de nuestra vida, mejorando y reestructurando nuestra realidad, dando grandes pasos en desarrollos innovadores, el mundo gira en un entorno más automático; Máquinas autómatas en diversas industrias que desarrollan diferentes actividades, pequeños robots que ofrecen servicios en casa, máquinas virtuales que sirven de entretenimiento, sin embargo, a la par de esto la robótica social lucha por una mayor interacción de las máquinas autómatas en la sociedad con el objetivo de brindar un servicio para aumentar la calidad de vida.

Para lograr este objetivo, se requiere que estos robots inteligentes dispongan de interfaces de comunicación cada vez más avanzadas facilitando la interacción con las personas, integrándose a nuestra vida cotidiana de mejor forma. De aquí surge la necesidad de obtener un mayor realismo en la comunicación, tanto en la parte visual, es decir la coordinación de las gesticulaciones, como en el contenido coherente e inteligente de ésta, por ende, a lo largo de este trabajo se desarrollará la implementación de Inteligencia Artificial y Emocional a una cabeza mecatrónica de aspecto realista.

Hoy en día, se pueden encontrar diversos productos tecnológicos que reciben comandos por voz para facilitar su uso y acceso, algoritmos que se van entrenando para acercarse más a los gustos del usuario, sin embargo, las respuestas siguen quedando en el nivel hombre - máquina, maestro - esclavo, dónde el usuario es aquél que dicta las órdenes y recibe la respuesta a su petición, y está es la línea que se busca evolucionar, este proyecto busca generar una verdadera interacción entre el hombre y el autómata, y el análisis de las respuestas del impacto de esto, es decir, el usuario no sólo recibirá lo que quiere sino una reacción de parte del robot, un gesto acorde a lo solicitado, recibido, emitido; eliminando la barrera fría antes mencionada, logrando una conversación de mayor calidad, al sentirse "comprendido" no sólo "servido".

Numerosos estudios confirman que la inteligencia emocional juega un papel importante para la sociedad en la que vivimos actualmente y es lo que se busca corroborar a lo largo de este estudio, si se produce un diferenciador o no, al generarse una respuesta de calidad "humana", a través del reconocimiento del estado de ánimo del usuario durante la conversación, la personalización a través de un sistema de reconocimiento facial y el apoyo visual de una máscara de silicona adicionada a la cabeza mecatrónica, que simula una apariencia de un hombre de la tercera edad.

2 COMUNICACIÓN HUMANA

2.1 EXPRESION Y COMUNICACIÓN

El ser humano es social por naturaleza. La comunicación es un proceso innato en el hombre, una necesidad básica para la que venimos determinados biológicamente. La comunicación es un acto

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

interactivo de relación humana en el que dos o más participantes intercambian un mensaje mediante un lenguaje o forma de expresión.

Comunicación, se define por [3], como un "proceso de transmisión de ideas donde dos o más sujetos intervienen en una interacción. Es la utilización de un código específico para la transmisión de un mensaje o una determinada experiencia en unidades semánticas con el objeto de permitir a los hombres relaciones entre sí."

Expresión, se define por [6], como "manifestar los pensamientos, actitudes o sentimientos por medio de la palabra, de los gestos o de los comportamientos. Este término proviene del latín *expressus* que significa exprimido, salido. Ahora bien, esta idea de hacer salir no implica, necesariamente, que esa exteriorización sea captada o sea recibida por el otro o los otros."

La expresión no se convierte de manera inmediata en comunicación, la expresión consiste en exteriorizar, mediante palabras u otros sistemas, una idea, un pensamiento, sentimiento o emoción que al ser percibido por otros genera el fenómeno de la comunicación.

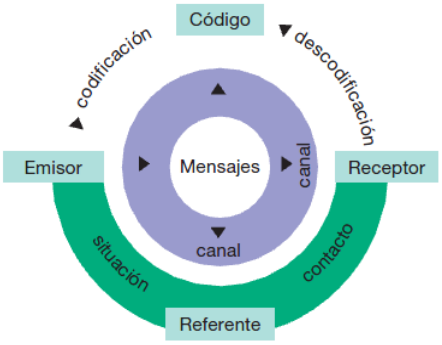


Figura 1. Elementos que intervienen en una comunicación efectiva [8]

2.2 EXPRESIÓN FACIAL

La expresión facial es una forma de comunicación no verbal. Es un medio principal de transmisión de información social entre los seres humanos, que también se produce en la mayoría de los mamíferos y algunas otras especies de animales. Es una de las regiones más complejas de la anatomía humana, tanto por el número de músculos y huesos que presenta como por la cantidad de combinaciones de movimientos que dichos músculos pueden realizar. Dotar a un autómata con la capacidad de asemejarse a las características faciales humanas es una actividad muy compleja, actualmente todas las propuestas robóticas realizan simplificaciones que permiten reducir tanto el número de componentes faciales emulados como su comportamiento.

A partir de una descripción de la anatomía muscular, únicamente puede obtenerse información de la relación entre la contracción muscular y las deformaciones que dicha contracción origina en la superficie del rostro. Sin embargo, desde un punto de vista de interacción social, es necesario determinar la inferencia existente entre las expresiones faciales, lo que dichas expresiones pretenden representar y lo que otros son capaces de interpretar a partir de las expresiones generadas.

Para el desarrollo de esta cabeza mecatrónica se tomaron en cuenta los músculos más significativos del rostro, involucrados en la expresión facial con la finalidad de poder mejorar la interacción del autómata con el humano [7].

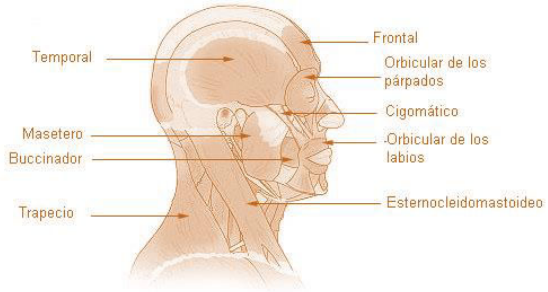


Figura 2. Musculatura de la cabeza y cuello

En la siguiente tabla se enlistan los músculos más significativos del rostro humano.

Tabla 1. Músculos más significativos del rostro humano

Músculo	*Función*
Frontal	Eleva las cejas; arruga la frente horizontalmente.
Occipital	Sostiene el cuello cabelludo posteriormente.
Orbicularis oculi	Protege los ojos de la luz intensa y las lesiones; produce el parpadeo; entrecierra los ojos, y conforma las cejas inferiormente.
Cigomático	Eleva las esquinas de la boca (músculo de la risa).
Orbicularis oris	Cierra los labios; sobresalen los labios (músculo de besar y silbar).
Temporal	Cierra, eleva y retracta la mandíbula;
Maseter	El músculo principal de cierre de la mandíbula; eleva la mandíbula.

Para dar este efecto en la cabeza mecatrónica se utilizaron 12 servomotores asociados a los músculos de la Tabla 1, obteniéndose de esta forma 23 grados de libertad que se controlan con la técnica de modulación por anchura de pulso (PWM).

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La Figura 3 detalla la ubicación de cada servomotor empleado y la Tabla 2, describe los músculos significativos que representan cada uno y el área de interés externa que impacta.

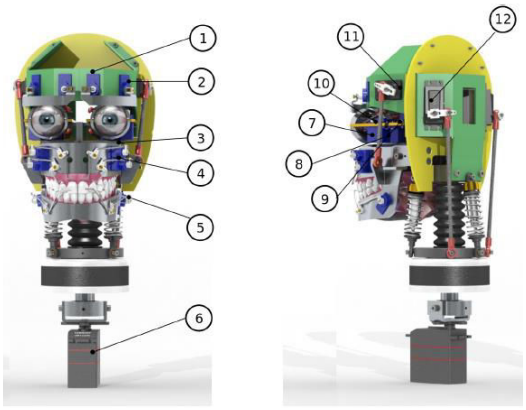


Figura 3. Ubicación de los servomotores

Tabla 2. Músculos representados por los servomotores

N.	Músculos más significativos	Área
1	Frontal (Par medial)	Frente y Cejas
2	Frontal (Par lateral)	Frente y Cejas
3	Levantar el labio superior	Boca
4	Zigomático mayor	Boca
5	Triangular, borla	Boca
6,12	Músculos del cuello	Cuello
7	Levanta parpados	Ojos
8	Recto superior e inferior	Ojos
9	Medial y lateral	Ojos
10	Par orbital and palpebral	Ojos
11	Masetero, temporal, pterigoideo	Quijada

3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

3.1 INTRODUCCIÓN

La estructura elegida para la nueva programación de este proyecto es "SMACH", la cual renuncia al tipo de programación tradicional, la típica programación secuencial, dónde línea por línea ejecuta cada bloque del código y cuando se produce un error la ejecución se detiene por completo o simplemente da paso a la siguiente línea. Sin embargo, con este tipo de programación el objetivo es dotar de "inteligencia" cada línea de código, al tener comunicación entre sí, es decir, en un principio la cabeza buscará algún movimiento, de ser así, le dará paso a la detección de rostros y/u objetos, consecutivamente, al encontrar un rostro comienza la rutina de hablar, para esto de forma inmediata envía la señal a los servomotores para detener los movimientos aleatorios. Una vez terminado el saludo comienza a interactuar de forma natural, posteriormente escucha y reconoce las palabras emitidas por el usuario, y en base a la charla entre estos las respuestas de la cabeza serán lo más acordes posibles con "inteligencia artificial y emocional". Por nombrar un ejemplo de las múltiples situaciones que pueden ocurrir, se tiene el caso de que el usuario comience hablándole a la cabeza, para tal efecto ésta en seguida comenzará a entablar la conversación, saltándose la rutina del saludo.

La diferencia radica precisamente en este punto, donde la cabeza reacciona de acuerdo a la situación que se le presenta, no es necesario inicializarla siempre en el mismo punto, como tal no existe una respuesta totalmente predefinida, la respuesta busca asemejarse a una reacción humana, una plática casual, cordial e inteligente. Este es el objetivo a cumplir con este tipo de programación SMACH, a través de la creación de máquinas de estado para comportamientos robustos.

3.2 ESTRUCTURA SMACH

SMACH es una arquitectura de nivel de tarea para crear rápidamente un comportamiento complejo en el robot. En su esencia, SMACH [9] es una biblioteca ROS-independiente de Python para construir máquinas de estados jerárquicos. SMACH es una nueva biblioteca que aprovecha conceptos clásicos con el fin de crear rápidamente un comportamiento robusto con código mantenible y modular.

Ha sido desarrollado en el 2010 bajo la licencia BSD por Jonathan Bohren, doctorando en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Johns Hopkins especializado en robótica en el Laboratorio de Computación de detección y Robótica.

3.3 ¿CUÁNDO SE DEBE UTILIZAR SMACH?

SMACH es útil cuando se busca que un robot ejecute un comportamiento robusto y complejo, donde todos los posibles estados y sus transiciones, se puedan describir de forma explícita.

Dicho de otra forma, basado en [2], es la unión de diferentes módulos para que los sistemas de los manipuladores robóticos móviles realicen actividades interesantes y complejas con inteligencia artificial.

Prototipo rápido: La sintaxis de SMACH está basada en Pyhton, gracias a esto ofrece la facilidad de crear máquinas de estados, y con esta misma sencillez ponerla en uso de forma rápida y efectiva.

Máquinas de estado complejas: SMACH permite diseñar, mantener y compilar grandes y complejas máquinas de estado jerárquicas. La Figura 4 muestra un ejemplo de la estructura jerárquica.

Introspección: SMACH permite una total introspección en las máquinas de estados, transiciones de estado, flujo de datos, etc.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

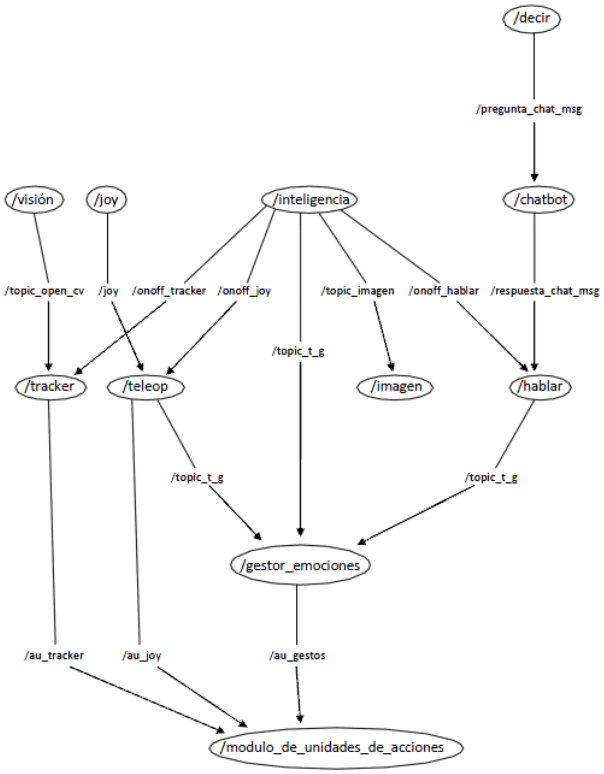


Figura 4. Estructura en ROS del autómata

Las siguientes imágenes muestran algunas escenas de la interacción humano-robot soportadas por la estructura de programación SMACH, permitiendo el uso de máquinas de estado para comportamiento robusto, con ventajas como menor número de líneas de código y disminución de recursos informáticos.

Estas figuras ejemplifican diferentes gesticulaciones ejecutadas por el autómata.

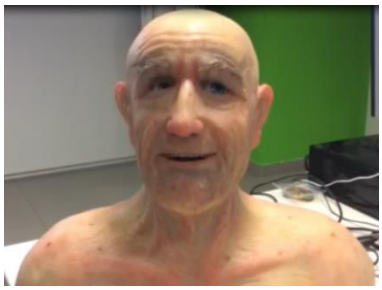


Figura 5. Expresión ejecutada al escuchar

Figura 6. Expresión de felicidad

Figura 7. Expresión de desánimo

Figura 8. Expresión de susto

Figura 9. Expresión de parpadeo

Figura 10. Expresión de sorpresa

Esta programación permite interactuar más con los "sentidos" agregados al robot, es decir, le permite simultáneamente ver, oír y hablar (módulo integrado con Verbio), sin necesidad de comenzar siempre desde el mismo punto.

Aunado a esto, cuenta con la capacidad de reconocer a la persona con la que está interactuando, en el siguiente apartado se detallará esta capacidad. De igual forma, la inteligencia emocional es representada por la gesticulación esencial de las expresiones básicas universales enunciadas en los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

trabajos de Paul Ekman, [4] *alegría, tristeza, miedo, sorpresa, asco y enfado.*

Cuando el usuario entabla una conversación con el autómata y pronuncia ciertos estados de ánimo, el robot gesticula estas expresiones e intenta, de ser necesario, alentar al usuario en cuestión. Por ejemplo, si la persona que esta interactuando con la cabeza mecatrónica enuncia algún dialogo como el siguiente:

- ¡hola! ¿cómo estás?
- Estoy triste, he recibido una mala noticia

El autómata gesticularía una expresión de sorpresa y simultáneamente pronunciaría:

- ¿por qué? ¿qué ha pasado?

Esto se facilita por el uso de este tipo de estructura de programación, a base de máquinas de estado jerárquicas aptas para un desempeño robusto y simultáneo.

4 RECONOCIMIENTO FACIAL

4.1 INTRODUCCIÓN

El reconocimiento facial es una capacidad del ser humano, a la cual no se le suele prestar mucha atención debido a su naturalidad. Desde la niñez se empieza a hacer uso de esta capacidad, no sólo se aprende a reconocer objetos, colores, sensaciones, no obstante, desde esta etapa vamos registrando en nuestra mente quién es mamá, quién es papá, nuestros hermanos, la familia en general y todo ese núcleo social que nos rodea. A lo largo de nuestra vida, si después de muchos años volvemos a ver a una persona solemos reconocerla, aun cuando su expresión haya cambiado, su apariencia superficial, como su color de cabello, si tiene gafas, barba, bigote y un sinfín de características que puede tener su "nueva apariencia", a pesar de ello somos capaces de reconocer a la persona en cuestión.

El reconocimiento facial definido por [1] es la rama de la biometría que se encarga de la validación o identificación de una persona utilizando una imagen de su cara. Los sistemas que realizan reconocimiento facial funcionan en dos modos distintos: identificación y verificación.

En el modo identificación, se tiene como objetivo identificar una persona de la cual se desconoce su identidad, el sistema intenta determinar si el usuario, del que se ha capturado el rasgo biométrico, se encuentra en la base de datos, para lo cual se realiza una comparación con todos los modelos de los usuarios previamente registrados en la base de datos.

En este caso, se trata de una comparación de "uno-a-muchos" y como resultado se genera una lista de candidatos cuyas puntuaciones están ordenadas de mayor a menor. Si ninguna de las puntuaciones obtenidas ha alcanzado el umbral de decisión se informa que el sistema no ha encontrado ningún candidato para dicho usuario.

Para profundizar en el funcionamiento de este modo se puede observar en la Figura 11 todas las etapas por las que pasa éste antes de dictar el veredicto.

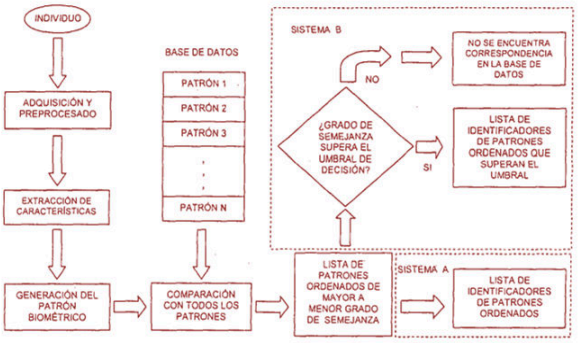


Figura 11. Funcionamiento del sistema en modo identificación

Cuando se utiliza el sistema en modo verificación (1:1), el usuario presenta su rasgo biométrico y se identifica. Posteriormente, se busca en la base de datos el modelo de usuario correspondiente a dicha identificación y se compara con el creado a partir de la realización actual. Dicho proceso se denomina "reconocimiento positivo" por [5] y requiere una comparación "uno-a-uno".

La decisión de aceptar o rechazar al usuario dependerá de si el valor de similitud o probabilidad obtenida supera o no un determinado umbral de decisión. Se tratará de un "usuario genuino" si la puntuación ha superado el umbral establecido y de un "usuario impostor" en el caso contrario como se observa en Figura 12.

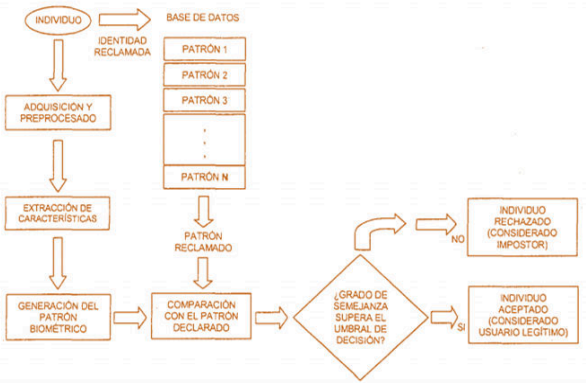


Figura 12. Funcionamiento del sistema en modo verificación

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.2 ALGORITMO SELECCIONADO

El algoritmo a implementar se llama "Haar Cascade" desarrollado en las librerías de OpenCV. Se basa en la extracción de características con filtros de 'base Haar' y clasificadores en modo cascada. Dicho método, llamado 'Clasificadores Haar', fue propuesto por Paul Viola y Michael Jones [10], el cual es un clasificador con entrenamiento supervisado basado en arboles de decisión.

Posteriormente al entrenar el clasificador, puede ser aplicado a regiones de interés en una imagen de entrada.

La denominación "cascade" o cascada significa que el clasificador resultante consiste en varios clasificadores simples que son aplicados subsecuentemente a una región de interés hasta que en alguna etapa el candidato es rechazado o todas las etapas son aceptadas.

4.3 IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación de este algoritmo, es necesaria la creación de una base de datos (BD) que contiene en carpetas independientes todas las imágenes de los usuarios que servirán para entrenar al sistema y efectuar adecuadamente el reconocimiento facial.

Pre procesamiento de Imágenes: Se normaliza el tamaño de las imágenes de la BD y la recibida en tiempo real por los ojos del autómata (web cam), además se ecualiza el contraste con el objetivo de encontrar un histograma más uniforme entre estas.

Detección Facial: Gracias al uso de las librerías de OpenCV como se mencionaba en la introducción se emplea el algoritmo de detección de patrones Viola-Jones con el clasificador Haar Cascade.

Tratamiento de la Imagen: Al detectarse el rostro se delimita con un círculo rojo aislando el resto de la imagen.

Extracción y comparación de características: Este clasificador emplea la técnica de EigenFaces que comparará la imagen entrante con la BD, a través de la obtención de los componentes principales de la matriz de covarianzas formada por ambas imágenes. Se comparan las distancias entre el vector de la imagen entrante con el resto. Si el resultado es menor que un umbral previamente fijado, se habrá reconocido la cara positivamente. Los datos de configuración son:

Número de eigenfaces: 200.

Umbral: 10000.

Teniendo como ventaja la rapidez, que toma gran relevancia para mejorar la interacción al permitir activar el saludo personalizado inmediatamente, sin embargo su funcionamiento no logra superar condiciones muy adversas en el ámbito de la iluminación o si se cuenta con un número muy limitado de imágenes de entrenamiento (menor a 8).

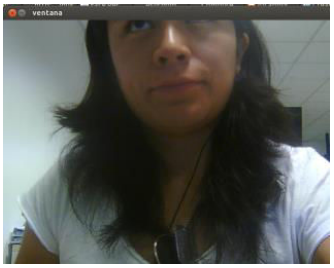
Pseudocódigo:

```
INICIO
  Mientras () Hacer:
    img := ecualizar(img);
    Si (deteccionCara(img)) Entonces:
        img := recortarCara(img);
        resultado := reconocimientoCara(img);
        Si (resultado < umbral) Entonces:
          SALUDO_PERSONALIZADO();
        Fin Si
    Fin Si
  Fin Mientras
FIN
```

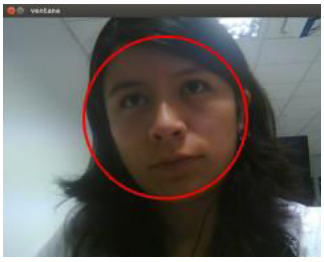
Las siguientes imágenes muestran los 3 casos posibles que podemos obtener en el reconocimiento facial de la cabeza mecatrónica

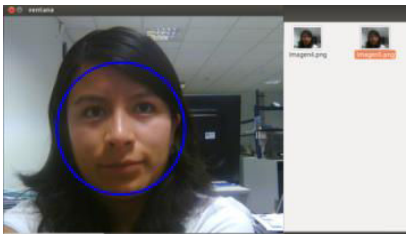
Caso I.- No hay detección de rostro
Caso II.- Detecta rostro pero no lo reconoce dentro de la base de datos
Caso III.- Detecta y reconoce el rostro del usuario dentro de la base de datos

Caso I



Caso II





Caso III

Figura 13. a) Caso I b) Caso II c) Caso III

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En el caso II, detecta un rostro, sin embargo, el usuario no aparece en la BD, por ende, el círculo se mantiene en rojo, a diferencia del caso III donde el usuario si aparece en la BD (lado superior izquierdo, se notan dos de las imágenes empleadas en el entrenamiento). El círculo cambia a color azul y la cabeza mecatrónica hace un saludo personalizado, con el nombre de la persona que ha detectado.

5 CONCLUSIONES

Se ha llegado a la conclusión que la máscara de silicona y la estructura SMACH proporcionan un grado notable de realismo que mejora de gran manera la interacción del usuario con el robot, de igual forma utilizando las gesticulaciones emocionales como respuesta y la personalización a través del reconocimiento facial que posee, genera como resultado una interacción con mayor calidez. En base a las encuestas realizadas y al comparativo de estos resultados con los obtenidos previamente sin estos cambios, el aumento de realismo fue del 35% obteniendo una calificación promedio por los usuarios de 8.8 sobre 10. De igual forma, aprovechando estas bondades agregadas al robot, para línea futura queda trazado el uso de éste, en el posible diagnóstico y/o tratamiento de enfermedades neurodegenerativas, como el caso del Alzheimer o trastornos como depresión en personas de la tercera edad, apoyándose de la capacidad de "reconocer" al usuario pudiendo personalizarse las pruebas psicológicas, recordatorio de fechas importantes, medicinas, citas médicas, entre otras pruebas.

Este estudio ha sido beneficioso para seguir fomentando el uso de robots sociales y mejorar su inmersión en la sociedad, eliminando la barrera máquina – esclavo, transformándola en una interacción con mayor naturalidad y realismo con el apoyo de la introducción de nuevas capacidades, como la inteligencia emocional, que juega un papel muy importante en la línea futura que se pretende seguir, al transformar la ideología hasta llevar al usuario a la percepción de sentirse "comprendido" no sólo "servido" como en la mayoría de los dispositivos con los que se cuenta en la actualidad.

Agradecimientos

Se agradece el total apoyo del parque tecnológico CARTIF (Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y Fabricación Avanzada), así como de la Universidad de Valladolid, el programa Iberoamérica + Asia de Banco Santander y el trabajo previo del Mtro. David Loza.

Referencias

[1] Berchesi, S.; Di Martino L. y Lema, G.; (2012) "Proyecto Faceval", Montevideo: Universidad de la República.

[2] Bohren, J. (2010) "SMACH Wiki ROS" Open Source Robotics Fundation, 01 Julio 2010.. Available: http://wiki.ros.org/smach

[3] De Miguel Pascual, R. "Fundamentos de comunicación humana", Alicante: Editorial Club Universitario.

[4] Ekman, P. y Friesen, W. (1978) "Facial action coding system: A technique for the measurement of facial movement", Palo Alto: Consulting Psychologists Press.

[5] Federación Internacional de Robótica (1999), World Robots

[6] Garcia Fernandez, M. D. "Comunicación y expresión" [En línea]. Available: http://www.desarrollosdg.com.ar/educativos/expresion/aceptados.php. [Último acceso: 27 Mayo 2014].

[7] Loza, D . (2013) Diseño y Construcción de una cabeza mecatrónica de aspecto realista Valladolid, TFM Universidad de Valladolid

[8] McGraw-Hill, (2010) "Comunicación Humana", McGraw-Hill

[9] Open Source Robotics Fundation (2010) "Wiki ROS", 01 Julio 2010. [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/pr2_plugs_executive.

[10] Viola, P; Jones. M,J; (2001) "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features". Conference On Computer Vision And Pattern Recognition, 2001.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PARA LA DINÁMICA SINÁPTICA DE UN SISTEMA NEURONAL BASADOS EN REDES DE PETRI Y MÁQUINAS DE ESTADOS

Martin Bogdan, Karim El-Laithy
Leipzig University. Faculty of Mathematic and Computer Science.
Postfach 10 09 20, 04009 Leipzig, Germany
bogdan@informatik.uni-leipzig.de; kellaithy@informatik.uni-leipzig.de

Juan Ignacio Latorre, Emilio Jiménez
Universidad de La Rioja. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
C/ Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, Spain
juan-ignacio.latorre@unirioja.es; emilio.jimenez@unirioja.es

Resumen

Este trabajo forma parte de un complejo proyecto de investigación multidisciplinar que como objetivo último busca la reconsideración de la arquitectura de computadores en base a enfoques inspirados en sistemas biológicos.
Los sistemas de información neuronales suelen mejorar las prestaciones de las supercomputadoras en términos de operaciones por segundo, por no hablar de su inteligencia, flexibilidad, y habilidad para generalizar sistemas neuronales como el cerebro. Por otra parte, durante las pasadas décadas la investigación en neurología ha progresado tremendamente, permitiéndonos investigar tejidos neuronales desde estructuras procedentes de cultivos celulares hasta estructuras cerebrales.
No obstante, el principio fundamental subyacente del procesamiento de la información en el cerebro o en tejidos neuronales es todavía desconocido y por ello no puede ser introducido en arquitecturas de computadoras fiables.
El objetivo de este artículo dentro de dicho proyecto general se centra en modelar mediante formalismos discretos, especialmente máquinas de estados y redes de Petri, el comportamiento dinámico sináptico observado en sistemas neuronales, en busca de conocimiento sobre el comportamiento de dichos sistemas, que pueda servir de base (muy inicial) para posteriores desarrollos computacionales.

Palabras Clave: Máquinas de estados, redes de Petri, redes de Petri experimentales, red neuronal, sinapsis, cerebro.

1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que los sistemas de información neuronales suelen mejorar las prestaciones de las supercomputadoras en términos de operaciones por segundo – por no hablar de su inteligencia, flexibilidad, y habilidad para generalizar sistemas neuronales como el cerebro – raramente se ha planteado una reconsideración de la arquitectura de computadores en base a enfoques inspirados en sistemas biológicos. Por otra parte, durante las pasadas décadas la investigación en neurología progresó tremendamente, permitiéndonos investigar tejidos neuronales desde estructuras procedentes de cultivos celulares hasta estructuras cerebrales. No obstante, el principio fundamental subyacente del procesamiento de la información en el cerebro o en tejidos neuronales es todavía desconocido y por ello no puede ser introducido en arquitecturas de computadoras fiables.

El objetivo de este proyecto consiste en combinar principios del procesamiento de la información modelados como un tipo de máquina de estados y arquitectura de computadores, concluyendo en la "Máquina de estados computadora inspirada en el cerebro". Para lograr este propósito se plantea una metodología de modelado que trata de afrontar un doble problema. Por una parte, se considera la construcción un modelo basado en el paradigma de las redes de Petri utilizando un elevado volumen de datos recuperados del comportamiento del sistema original. Por otra parte, este modelo debe tener la capacidad de reconfiguración, con el propósito de ser capaz de modificar sustancialmente su comportamiento en función de su experiencia.

En este trabajo se condensa los resultados presentados en [26] sobre esa línea de investigación así como las metodologías que se están empleando en busca de modelos que, basados en el comportamiento observado, puedan dar idea del mecanismo intrínseco que lleva a dicho comportamiento. Además el artículo se presenta como una muestra de la línea de investigación emprendida en busca de posibles interacciones con investigadores de otras líneas, no

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

necesariamente en modelado y simulación o en control en tiempo real sino también en campos como arquitectura de computadores, tiempo real, etc.

2 CONCEPTO Y OBJETIVO

Los sistemas de procesamiento de la información neuronales mejoran sin dificultades incluso el rendimiento de supercomputadoras desde el punto de vista de operaciones por segundo – por no hablar de su inteligencia, flexibilidad y habilidad para generalizar sistemas neuronales como el cerebro. La investigación en neurociencia ha progresado rápidamente durante las últimas décadas, permitiéndonos así investigar tejidos neuronales, desde estructuras de cultivos celulares hasta estructuras cerebrales. Sin embargo, el principio fundamental subyacente del procesado de la información en el cerebro o en los tejidos neuronales está todavía siendo descifrado y por lo tanto todavía no puede ser introducido en arquitecturas de computadoras fiables.

Para superar este problema, es importante afrontarlo a través de un enfoque multidisciplinar que incluya aspectos neurológicos, teóricos y técnicos. Por ejemplo, a partir de registros de cultivos celulares podrían utilizarse enfoques teóricos dirigidos por redes neuronales activas con el propósito de desarrollar una máquina de estados por medio de un algoritmo que será finalmente transformado en una arquitectura de computadores: la máquina de estados computadora inspirada en el cerebro. Con el ánimo de ser prácticos, los registros de cultivos celulares pueden sustituirse por simulaciones de trenes de impulsos similares a los neuronales. Usando actividades neuronales simuladas, son necesarias simulaciones a gran escala para suministrar un conjunto de redes neuronales activas (SNN) que puedan replicar el comportamiento simulado. Este último proceso consiste esencialmente en una tarea de modelado.

El principal sistema computacional objetivo es una máquina de estados finita, capaz de modelar el procesado de la información de la forma en que se produce en un sistema neuronal vivo. El sustrato teórico de este modelo consiste en los estados de plasticidad sináptica: las sinapsis como sistemas físicos desarrollan un conjunto de estados de plasticidad que se corresponden con un conjunto discreto de niveles de energía. El procesado de información por redes neuronales activas que usan modelos sinápticos con una temporización de la excitación dependiente de la plasticidad (STDP) puede verse como una máquina de estados finitos mientras que los estados neuronales se definen a través de los conjuntos de los estados estables en el tiempo generados a partir de las dinámicas sinápticas implicadas. Las computaciones desarrolladas (procesado de la información) consisten en una secuencia de transiciones entre los estados relacionados con las sinapsis.

Este proyecto investiga la implicación de la dimensión temporal como base para la definición de los estados neuronales en la red neuronal. Investigamos cómo asociar el tiempo con los datos a través de las transiciones entre los diferentes estados. La implicación del tiempo en la definición de estados y su asociación con el procesado de la información es, en general, un factor crucial porque distingue el procesado en el sistema nervioso central (CNS) de la clase general de máquinas de Turing. El presente trabajo está basado en el concepto de estados relacionados con las sinapsis e introduce un marco novedoso que permite tanto la captura como la implementación de los métodos de procesado de información encontrados en el sistema nervioso central.

La popularidad y la extendida aplicabilidad del modelo computacional de las máquinas de estado las convierten en una solución ideal para importar las capacidades computacionales del cerebro en el campo de la ciencia computaciones. Expresado de otra forma, el análisis del cerebro y de las redes neuronales como máquinas abstractas es una temática relativamente antigua pero el análisis de simulaciones desarrolladas en modelos relacionados de redes reales (redes neuronales artificiales) constituye un enfoque novedoso, sobre todo tomando en consideración el análisis de la coherencia temporal en los modelos de máquinas de estados para obtener máquinas de estado finitas temporales. Adicionalmente, el uso de un formalismo de alto nivel basado en máquinas de estados y en cadenas de Markov, las redes de Petri, para intentar modelar los estados cerebrales obtenidos, presenta una clara novedad frente al estado del arte en este campo.

3 ESTADO DEL ARTE DE LA COMPUTACIÓN DE LA MÁQUINA DE ESTADOS BASADA EN EL CEREBRO

Históricamente, la búsqueda por capturar el núcleo del procesamiento de la información en los sistemas neuronales biológicos es incluso anterior a la introducción de la arquitectura de Von Neumann o el enfoque de Zuse. Comenzando con la idea de construir un cerebro artificial Alan Turing (1912-1954) propuso uno de los primeros computadores hace casi sesenta años. Los tempranos intentos por comprender las funciones del cerebro y qué hay más allá, i.e., estudiar la cognición y la conciencia, fueron impulsados con la invención del computador [21].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Se creía que los computadores, como un tipo de máquinas de Turing, podrían (algún día) llegar a ser un cerebro artificial. Esta es la pregunta primigenia, que todavía no ha sido respondida: ¿Puede una máquina de Turing o una máquina universal emular un cerebro totalmente funcional? Las capacidades actuales de la inteligencia artificial moderna y de la ingeniería de computadores con todos los campos relacionados no permiten disipar la duda de si es posible o no emular el cerebro biológico en la medida en que todavía está lejos la comprensión completa de su procesado de información básica. Constituye un tema de gran importancia la duda sobre la aplicabilidad y viabilidad de esta imitación.

Es posible argumentar que todas las máquinas de computación existentes, incluyendo el cerebro, son máquinas de estados finitas [23,4]. Si esto es así, no existe en la realidad una máquina que posea una productividad ilimitada de sistemas de símbolos. Se acumulan los estudios recientes y más evidencias enfatizando que las funciones básicas del cerebro (principalmente las que son responsables de la memoria y del aprendizaje más que la consciencia y la cognición) son implementables como máquinas de estados suponiendo que se disponga de nuevas metodologías y estructuras de programación capaces de capturar la esencia de estas funciones como procesos [3,24].

La hipótesis central de esta consideración es la relación entre un espacio de estados cognitivos infinito y un espacio de estados físico (o biológico) finito. Como una solución conceptual, se acepta normalmente que solamente el espacio físico se considera real y, por lo tanto, el del comportamiento real de un sistema cognitivo, que es el de una máquina de estados finitos. Sin embargo, se han diseñado modelos computacionales clásicos de la mente para abordar la ilimitada productividad de sistemas de símbolos, que requiere la potencia de una máquina de Turing. O, en otras palabras, las capacidades de representación de uno de estos sistemas son, por asunción, no acotadas bajo una idealización apropiada. Como consecuencia, el espacio de estados cognitivo infinito es la idealización apropiada del espacio de estados físico finito de la implementación.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA MÁQUINA DE ESTADOS FINITA TEMPORAL.

Con el objeto de comprender la relevancia de lograr el modelo propuesto de la máquina de estados finita, consideremos las siguientes características observadas por el análisis realizado a la circuitería cerebral en un contexto comportamental [10]:

– La representación de información sensorial se desarrolla según se necesite, lo cual queda reflejado a través de la conmutación entre la aparición y desaparición de ensamblajes celulares (enlazados por sincronía) a través del mismo área cortical.

– La información sensorial está representada a un nivel sináptico más que celular [10]. Por ello, el poder expresivo de la circuitería neuronal en términos de su capacidad de estados internos de transición revela, en cierto modo, su poder computacional. Esta capacidad no puede ser probada con un enfoque de "cuántos" sino también de "cuánta duración".

Estas afirmaciones implican que las computaciones en los tejidos corticales pueden ser vistas como un autómata: una máquina de estado finita. Con este hecho en mente y con el objeto de definir la teoría de las máquinas de estado finitas temporizadas es preciso considerar primero la clase de las redes dinámicas (DN). Estas son las redes que combinan sinapsis realistas biológicamente con dinámica neuronal similar a aquellas usadas en nuestras simulaciones. El tren de pulsos de entrada es una función de entrada para una red dinámica. Esta red dinámica implementa un operador aplicado a la función de entrada y desarrolla la relación con un conjunto de funciones de salida. El tamaño del conjunto de funciones de salida es el número de neuronas en la red nuclear, excluyendo las funciones de entrada.

Aceptando que las circuiterías corticales desarrollan, de una manera abstracta, un conjunto de computaciones no lineales dinámicas, la capacidad computacional matemáticamente probadas de las redes dinámicas sugiere que la red dinámica, cuando es suficientemente compleja, es capaz de emular el poder computacional de un circuito cortical, siempre y cuando los modelos sináptico y neuronal pueden imitar la esencia requerida de la capacidad de procesamiento de la información.

El término máquina de estado finita temporal (tFMS) refleja la nueva implementación de una red dinámica introducida en [6] utilizando el modelo sináptico estocástico modificado de [9]. Con el objetivo de definir el nuevo marco abstracto propuesto en este documento, la definición de un estado (o un estado temporal) es el punto de partida para recoger el paradigma de este marco. El término estado indica que un grupo de neuronas actúa colectivamente con su actividad durante una duración limitada (básicamente variable) para representar cierta información de entrada o bien para señalizar el procesado de esa información.

Lo que es más importante, para distinguir cierta actividad de excitación portadora de características

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

especiales, se requiere disponer de un tipo de actividad de referencia para realizar comparaciones. Por lo tanto, los estados se definen como distancias estables entre la red de actividades en respuesta a dos entradas que son ligeramente diferentes entre sí.

En el modelo computacional de la máquina de estados finitos temporizados y con el objetivo de cumplir los postulados de enlace (ver por ejemplo [26]), un estado se define relativo a una actividad de referencia. En comparación con el comportamiento de la red de referencia se define una representación estable de cierta información de entrada correspondiente a cierto intervalo de tiempo del orden de decenas de milisegundos. La diferencia estable entre las respuesta respecto a una referencia indica un tipo de agrupación interna (o coherencia) en esta respuesta; por lo tanto, distancias estables representan estados internos.

Dentro de un estado, pulsos de excitación individuales así como el grado absoluto de coherencia son irrelevantes [25], sólo la existencia de diferentes niveles informa sobre el procesamiento de la información en la red dinámica.

El grupo de trabajo de WP4 ya ha demostrado una prueba del concepto en [7,8]. Por medio de la simulación de una columna de neuronas acopladas por medio de sinapsis dinámicas y aplicando la definición de estados indicada previamente, ha sido posible describir el comportamiento de la red como secuencias de estados y observar transiciones entre estados.

La figura 1 ilustra los estados y las transiciones entre estados que han sido extraídos de la actividad de la red y representa cada estado por medio de la legra griega σ. La secuencia de transiciones de estados ilustrada en la figura es el rendimiento del modelo computacional novedoso propuesto para la máquina de estado finita temporal. Estos estados y las transiciones de estados reflejan, de una manera abstracta, los algoritmos generales disponibles para las computaciones en la red como en una máquina de estados. Los estados que duran más señalizan más situaciones de procesamiento final que aquéllos que se mantienen menos tiempo.

Los nuevos estados estables transitorios reflejan una habilidad emergente para procesar y representar características de entrada en estados de actividades que se encuentran bien definidos internamente. Los análisis que describimos aquí destacan las características mencionadas en relación con el comienzo de esta tarea. En particular la conmutación entre estados y la variabilidad del periodo de tiempo se cumple para la columna de neuronas simuladas. Adoptando estas características permite que las redes neuronales activas hereden nuevas y potentes prestaciones computacionales similares a las capacidades de las mini columnas corticales. Este objetivo es alcanzable solamente cuando las dinámicas sinápticas son suficientemente complejas como para codificar implícitamente la información de entrada requerida.

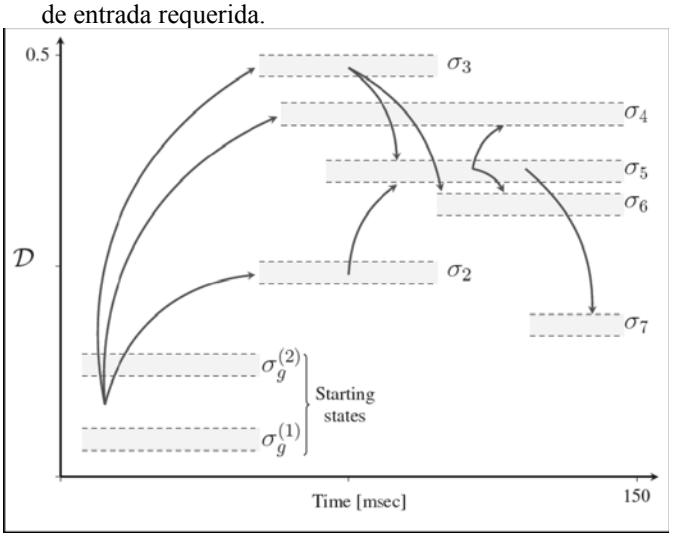


Figura 1: Resultado del análisis básico obtenido en [7,8]

5 MODELADO BASADO EN REDES DE PETRI RECONFIGURABLES

Diferentes autores han propuesto distintas metodologías para construir modelos de sistemas de eventos discretos basados en redes de Petri [20,18,11,12,15]. No obstante son escasas las referencias que proponen la construcción de un modelo a partir exclusivamente de un volumen de datos experimentales que puede ser incompleto para la definición del modelo [16].

Por otra parte, la construcción de un sistema de red de Petri reconfigurable ha sido también el objetivo de numerosas investigaciones. El trabajo pionero de [1] introduce las redes de Petri estratificadas como una subclase de las redes de Petri automodificables definidas a su vez por [22]. Las redes de Petri estratificadas cambian por automodificación y pueden ser utilizadas para el modelado de procesos dinámicos cuya estructura evoluciona a lo largo del proceso de computación. Además, [5] describe una teoría de transformaciones para redes de Petri derivada de transformaciones de grafos o gramáticas de grafos aplicadas como modificaciones progresivas de la estructura estática. Estas ideas contribuyen a la base formal del modelado top-down, a la verificación de redes de Petri y a variaciones en el proceso de desarrollo. El concepto generaliza la idea de fusión de lugares por medio de la unión de subredes utilizando interfaces.

La contribución [17] desarrolla un enfoque para modelar software abierto y reconfigurable por medio

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de redes de Petri estocásticas. Estos sistemas pueden tomar decisiones de forma automática de acuerdo a su propio comportamiento, basados en la evaluación de la efectividad de las estrategias de reconfiguración.

Un tema relevante en el análisis de las transformaciones de una red de Petri consiste en las modificaciones que no alteran el comportamiento del sistema. Por ejemplo [2] introdujo algunas transformaciones en las redes de Petri que preservan ciertas propiedades y permiten simplificar o redefinir un sistema. [19] aborda las técnicas de transformación y descomposición para la mejora de la aplicabilidad de técnicas estructurales para el análisis de la vivacidad de redes de Petri. Las transformaciones tienen como propósito la obtención de redes de Petri para las cuales existen resultados ampliamente conocidos para la caracterización de ciertas propiedades estructurales.

En [14] se presentan ciertas operaciones matriciales aplicadas a las matrices de incidencia de un conjunto de redes de Petri alternativas. Estas operaciones corresponden a transformaciones de las redes de Petri alternativas que preservan su comportamiento.

6 OBJETIVOS DEL MODELADO

La metodología propuesta en este documento se plantea para la construcción de una red de Petri a partir de información recuperada de su comportamiento. Esta información puede ser generada por medio de experimentos o por observación de un sistema existente cuyo comportamiento debe ser imitado por el modelo de red de Petri. Debido a limitaciones en la observación, por ejemplo en los experimentos disponibles, la información experimental puede ser incompleta a la hora de reflejar el comportamiento real del sistema en el modelo.

En el modelo de red de Petri que se presentará en este documento, la falta de conocimiento en el comportamiento del sistema se abordará del mismo modo que la capacidad del modelo del sistema para evolucionar y autoreconfigurarse como consecuencia de su experiencia pasada. Esta experiencia y sus implicaciones en cambios comportamentales del sistema pueden ser considerados como un proceso de aprendizaje del sistema.

7 FORMALISMO SELECCIONADO: LAS RdP EXPERIMENTALES

El formalismo considerado para construir el modelo de un sistema real es el de las redes de Petri experimentales, definidas de la siguiente manera:

$$R = <P, T, \mathbf{W}^-, \mathbf{W}^+, \mathbf{m_0}, \mathbf{avtf}, \mathbf{freqf}>$$

Donde:

P es el conjunto de lugares.

T es el conjunto de transiciones. Debe considerarse que $P \cap T = \varnothing$ and $P \cup T \neq \varnothing$.

$\mathbf{W}^-$ es la matriz de incidencia de entrada.

$\mathbf{W}^+$ es la matriz de incidencia de salida. Ambas matrices de incidencia representan los arcos definidos entre los elementos del conjunto de lugares y los elementos del conjunto de transiciones.

avtf es una función que asocial un tiempo de disparo promedio a cada transición del conjunto T.

freqf es una función que asocia una frecuencia de aparición de una transición en el proceso de adquisición de experiencia o entrenamiento a cada transición del conjunto T.

Dado un conjunto de transiciones asociada a un conflicto dado $T_{cj} = \{t_a, t_b, \ldots, t_q\} \in T$ se les asigna una prioridad de disparo de acuerdo al valor asociado de **freqf**, siendo la máxima prioridad aquella que corresponda al mayor valor de frecuencia de aparición en el proceso de adquisición de experiencia o entrenamiento y así sucesivamente.

Un modelo construido a partir de este formalismo puede ser adaptado y entrenado a partir de un conjunto de datos experimentales para representar el sistema de eventos discreto que produce los datos mencionados que han sido registrados.

8 VENTAJAS DE ESTE ENFOQUE

Existen otros formalismos, diferentes de las redes de Petri experimentales, que permiten representar un sistema real por medio de un modelo cuantitativo a partir de datos experimentales, como por ejemplo las redes neuronales artificiales. No obstante, las redes de Petri experimentales proporcionan una mejora sustancial que consiste en que no modelan el sistema real como "cajas negras" sino que muestran de modo explícito la estructura interna del sistema real.

Esta representación explícita de la estructura interna del sistema real puede permitir al investigador conocer el estado actual en el que se encuentra el sistema así como los estados alcanzables y las probabilidades de cambiar a un nuevo estado.

Por otra parte, cuando la estructura interna del modelo es conocida, es posible desarrollar un análisis estructural del mismo así como un análisis de prestaciones.

Finalmente, esta visión privilegiada del comportamiento del modelo facilita una mejor comprensión del comportamiento del sistema real que pueda conducir a nuevos resultados en la investigación de éste último.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

9 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE UN SISTEMA REAL A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES.

La etapa de construcción de un modelo de red de Petri temporizada se lleva a cabo a partir de datos experimentales en la forma de n secuencias de estados, incluyendo la información del tiempo que transcurre entre cambios de estados. Cada una de las secuencias corresponde a un proceso de adquisición de experiencia o entrenamiento:

$seq_1=\{\sigma_{a1} -[time(a_1,b_1)]\rightarrow \sigma_{b1} -[time(b_1,c_1)]\rightarrow \sigma_{c1} \ldots\}$
$seq_2=\{\sigma_{a2} -[time(a_2,b_2)]\rightarrow \sigma_{b2} -[time(b_2,c_2)]\rightarrow \sigma_{c2} \ldots\}$
…
$seq_n=\{\sigma_{an} -[time(a_n,b_n)]\rightarrow \sigma_{bn} -[time(b_n,c_n)]\rightarrow \sigma_{cn} \ldots\}$

El conjunto formado por todas las secuencias es $S_{seq}=\{ seq_1 , seq_2 , \ldots , seq_n \}$.

Esta información debería cumplir ciertas características para permitir el desarrollo de un modelo preciso del comportamiento y de la estructura del sistema:

a) Todos los estados y posibles cambios de estado deberían aparecer en los datos experimentales para obtener un modelo preciso del comportamiento del sistema.

b) Los datos experimentales que pueden parecer redundantes, por repetitivos, pueden ser, por el contrario, útiles. Por ejemplo, si la misma secuencia de estados aparece varias veces en los datos experimentales no deben ser eliminadas las secuencias redundantes, por el contrario, la información necesaria para construir el modelo del sistema depende de la frecuencia de ocurrencia de cada cambio de estados. Esto es el caso, por ejemplo, de la prioridad de disparo de transiciones participantes en un conflicto en el modelo de red de Petri.

c) Como consecuencia de las consideraciones previas, cuanto más grande sea *n*, más preciso será el modelo obtenido.

Antes de construir el modelo pueden hacerse algunas suposiciones:

a) Cada estado está caracterizado por un único valor de energía y cada nivel estable de energía sólo puede estar asociado a un único estado.

b) Hay dos clases de cambios entre estados:

b.1) Cambios que se producen por causas conocidas, producidas por una relación causa efecto determinista.

b.2) Cambios cuya ocurrencia no puede modelarse de modo determinista debido a ausencia de conocimiento. Este fenómeno requiere la introducción de un factor de aleatoriedad en partes del modelo del sistema.

Una vez que se ha reunido la información experimental, puede abordarse la construcción del modelo basado en el formalismo de las redes de Petri experimentales. El siguiente algoritmo muestra un procedimiento para realizar este proceso de modelado:

Paso 1. Contar el número *m* de estados diferentes σ_i en los datos experimentales.

Paso 2. Crear dos matrices con ceros, de *m* filas y 1 columna, llamadas $\mathbf{W}^-$ y $\mathbf{W}^+$ respectivamente, que representan las matrices de incidencia de entrada y de salida del modelo.

Asociar a cada fila un estado diferente σ_i.

Seleccionar una secuencia de datos experimentales $seq_j=\{\sigma_{aj} -[time(a_j,b_j)]\rightarrow \sigma_{bj} -[time(b_j,c_j)]\rightarrow \sigma_{cj} \ldots\}$

Hacer 1 el elemento de la matriz W^- situado en la fila a_j así como el elemento de la matriz W^+ situado en la fila b_j.

Crear un vector **avt** con un único elemento (inicialmente) que contendrá el tiempo $[time(a_j,b_j)]$ de disparo de la transición, $avt(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj})$. Cada elemento de este vector se asociará a las columnas de $\mathbf{W}^-$ y $\mathbf{W}^+$ situadas en la misma posición, en este caso la columna 1 representa la transición entre los estados σ_{aj} y σ_{bj} , a su vez descritos por los lugares homónimos indicados en las filas a_j y b_j respectivamente .

Asignar 1 al contador *i* de transiciones analizadas.
Crear un vector **freq** que inicialmente tendrá un único elemento (de valor unidad) que representará la frecuencia de disparo de la transición $freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj})$. Cada elemento de este vector se asociará a las columnas de $\mathbf{W}^-$ y $\mathbf{W}^+$ situadas en la misma posición (lo que implica estar asociadas a la misma transición).

Sea $\mathbf{w}^-_{i,j}$ un elemento genérico de $\mathbf{W}^-$ localizado en la fila *i-ésima* y en la columna *j-ésima*, y sea $\mathbf{w}^+_{i,j}$ el elemento de $\mathbf{W}^+$ situado en la misma posición.

Sea *q* el número de columnas tanto en $\mathbf{W}^-$ como en $\mathbf{W}^+$.

Paso 3. Para cada secuencia de estados seq_i perteneciente al conjunto S_{seq}, repetir los siguientes pasos:

> **Paso 3.1.** Para cada columna de cualquiera de las matrices de incidencia $\mathbf{W}^-$ o $\mathbf{W}^+$ (significando para cada transición ya incluida en el modelo desarrollado hasta el momento) repetir:
>
> > **Paso 3.1.1.** Si existe un cambio de estado $\sigma_{aj} -[time(a_j,b_j)]\rightarrow \sigma_{bj}$ en seq_i , tal que es posible encontrar una columna *k* en $\mathbf{W}^-$ y

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$\mathbf{W}^+$ cumpliendo $\mathbf{w}^-_{aj,k} \neq 0$ y $\mathbf{w}^+_{bj,k} \neq 0$ (significando que la transición ha sido ya incluida en el modelo del sistema) entonces modificar los valores asociados a la transición de la siguiente forma:
$avt(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \leftarrow [avt(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \cdot freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \cdot i + \text{time}(a_j,b_j)] / [freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \cdot (i+1)]$

$freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \leftarrow [freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \cdot (i\text{-}1) +1] / i$

si no, modificar los valores asociados a la transición de la siguiente manera:

$freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \leftarrow [freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \cdot (i\text{-}1)] / i$

Paso 3.2. Para cada cambio de estado $\sigma_{aj} \text{—}[\text{time}(a_j,b_j)]\rightarrow \sigma_{bj}$ perteneciente a la secuencia seq_i que en el previo **paso 3.1.1**, se haya descubierto que no está incluida en las matrices de incidencia repetir:

Paso 3.2.1. Añadir una nueva columna en las matrices $\mathbf{W}^-$ y $\mathbf{W}^+$, completada con ceros, excepto el elemento de la a_j-*ésima* fila de $\mathbf{W}^-$ y el elemento de la b_j-*ésima* fila de $\mathbf{W}^+$, que debe hacerse 1.

Paso 3.2.2. Añadir un nuevo elemento en el vector **avt** con el valor siguiente:
$avt(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \leftarrow \text{time}(a_j,b_j)$

Paso 3.2.3. Añadir un nuevo elemento en el vector **freq** con el siguiente valor:
$freq(\sigma_{aj} \rightarrow \sigma_{bj}) \leftarrow 1 / i$ e incrementar el valor del contador i

El modelo de red de Petri, obtenido a partir de este procedimiento, puede evolucionar en el caso de que se consiga acceder a un conjunto adicional de datos experimentales con el objeto de actualizar los parámetros del modelo.

Una vez que el modelo ha sido actualizado, puede ser utilizado con valores constantes para los parámetros para diferentes propósitos como el análisis estructural, la evaluación de prestaciones o el análisis del comportamiento por dar solo unos ejemplos.

10 CONCLUSIONES.

Considerando el cerebro como un sistema computacional neurológico de naturaleza biológica, [7-9] propone una interpretación del comportamiento de diferentes características y componentes de los sistemas neuronales, como las sinapsis, la actividad de excitación y los estados neuronales dentro de un marco basado en conceptos energéticos. De acuerdo a este enfoque, [7-9] proponen una función de energía hipotética para modelar el comportamiento dinámico de las sinapsis.

La referencia [6] nuestra que una sinapsis alcanza puntos de operación estables y propone que las sinapsis de una red, operando a esos puntos estables, puede conducir a esta red a un estado interno perteneciente a conjuntos discretos de estados neuronales. Los estados neuronales existen mientras la red soporta la energía sináptica interna.

Por ello, como conclusiones de la aplicación de la metodología de desarrollo del modelo de un sistema neuronal por medio del formalismo de las redes de Petri, este sistema, cuyo comportamiento podría ser aproximado al de un sistema de eventos discreto, constituye un objetivo perfecto para la aplicación de la metodología de construcción de un modelo por medio de las redes de Petri experimentales. Como consecuencia, los autores de este artículo han emprendido una línea de investigación consistente en el desarrollo de un modelo para el mencionado sistema biológico, que podría permitir el análisis y una mejor comprensión del cerebro humano, así como el desarrollo de una nueva y eficiente arquitectura de computadores.

Agradecimientos
Este trabajo se ha llevado a cabo parcialmente gracias a la Ayuda para investigadores invitados en Campus Iberus 2013 concedida al Profesor Martin Bogdan en una estancia con el profesor Emilio Jiménez en la Universidad de La Rioja.

Referencias

[1] Badouel, E., Darondeau, P. “Stratified Petri nets”. Research Report No. 3128, INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique), 1997.

[2] Berthelot, G., “Transformations and decompositions of nets” in “PetriNets: Central Models and Their Properties, Advances in Petri Nets”. Lecture Notes in Computer Science, Brauer, W., Reisig, W., and Rozenberg, G. (Eds.), vol. 254-I, pp. 359–376. Springer, 1987.

[3] de Kamps M; Baier V; Drever J; Dietz M; Mosenlechner L; van der Velde F The state of MIIND. Neural Networks, vol. 21, pp.1164-1181. 2008.

[4] Duch, W., “Neurocognitive Informatics Manifesto”. In: Series of Information and Management Sciences, California Polytechnic State University, 8th Int Conf on Information and Management Sciences (IMS 2009), Kunming-Banna, Yunan, China, pp. 264-282.

[5] Ehrig, H., Hoffmann, K., Padberg, J., Ermel, C., Prange, U., Biermann, E. and Modica, T.,“Petri Net Transformations”, in Vedran Kordic (eds) “Petri Net. Theory and Applications”, I-TECH Education and Publishing, Vienna, 2008.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[6] El-laithy, K. “Towards a Brain-inspired information processing system: Modeling and analysis of synaptic dynamics”. PhD thesis, Leipzig University, 2011.

[7] El-Laithy, K. and Bogdan, M., “A hypothetical free synaptic energy function and related states of synchrony”. In Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN 2011, volume 6792 of Lecture Notes in Computer Science, pages 40-47. Springer, 2011.

[8] K. El-Laithy and M. Bogdan. On the capacity of transient internal states in liquid-state machines. In Artificial Neural Networks and Machine Learning -ICANN 2011, volume 6792 of Lecture Notes in Computer Science, pages 56-63. Springer, 2011.

[9] El-laithy, K. and Bogdan, M.. Synchrony state generation: An approach using stochastic synapses. J. of Artificial Intelligence and Soft Computing Research,1:17-26, 2011.

[10] Gilbert, C. D. and Sigman, M. (2007). Brain states: top-down influences in sensory processing. Neuron, 54(5):677–696.

[11] Gradišar, D. and G. Mušič. “Production-process modelling based on production-management data: a Petri-net approach”. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 20, No. 8, pp. 794-810, 2007.

[12] Jiménez, E., Pérez, M., Latorre, J. I. "Modelling and Simulation with Discrete and Continuous PN: Semantics and Delays", Proceedings of the 21st European Modelling and Simulation Symposium (EMSS 09). Puerto de la Cruz, Spain, vol. 2, pp. 14-19, September 2009.

[13] Latorre, J.I., El-Laithy, K., Bogdan, M., Jiménez, E., Generalidades sobre el modelado de la dinámica sináptica de un sistema neuronal por medio de los formalismos de las redes de Petri y las máquinas de estados. IX Simposio CEA de Control Inteligente 2013, Puerto de la Cruz (España), 2013.

[14] Latorre, J.I., Jiménez, E., Pérez, M., "Matrix-based operations and equivalence classes in alternative Petri nets" Proc. of the 23rd European Modelling and Simulation Symposium (EMSS11). Rome, Italy, pp.587-592, Sept.2011.

[15] Latorre, J.I., Jiménez, E., Pérez, M., “Simulation-Based Optimization for the Design of Discrete Event Systems Modeled by Parametric Petri Nets”. Proc. of the UKSim 5th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation (EMS2011), pp.150-155. Madrid, Nov.2011.

[16] Lorenz, R.; Bergenthum, R.; Mauser, S.; and Desel, J. “Synthesis of petri nets from finite partial languages”. Proceedings of the 7th International Conference on Application of Concurrency to System Design (ACSD), pages 157–166, 2007.

[17] Perez-Palacin, D. and Merseguer, J. “Performance evaluation of self-reconfigurable service-oriented software with stochastic Petri nets”. Electronic Notes in Theoretical Computer Science (ENTCS). Volume 261, pp. 181-201. 2010.

[18] Piera, M. A.; Guasch, T.; Porcar, V.; and Bacardit, M. “Constraint Satisfaction in the Automobile Industry: A Coloured Petri Net Simulation Model Approach”. In Bruzzone, A.G. and Williams, E. (Eds.): Proceedings of the 2005 Summer Computer Simulation Conference, pp. 267-273. 2005.

[19] Recalde, L., Teruel, E., Silva, M. "Transformation and Decomposition Techniques to Improve the Decision Power of the Rank Theorems". Proceedings of the Workshop on Petri Nets in System Engineering (PNSE'97), Hamburg, September 25-26, 1997 / Farwer, B.; Moldt, D.; Stehr, M.-O.: Report FBI-HH-B-205, pages 111-122. Universität Hamburg, September 1997.

[20] Recalde, L.; Silva, M.; Ezpeleta, J.; and Teruel, E. “Petri Nets and Manufacturing Systems: An Examples-Driven Tour”. In: Lectures on Concurrency and Petri Nets: Advances in Petri Nets, pages 742-788. Volume 3098 of Lecture Notes in Computer Science / Desel, J.; Reisig, W.; and Rozenberg, G. (editors). Springer-Verlag, June 2004.

[21] Sejnowski, T. J. (1989). The computer and the brain revisited. IEEE Annals of the History of Computing, 11(3):197–201.

[22] Valk, R. "Self-Modifying Nets, a Natural Extension of Petri nets". Proceedings of Icalp'78. Lecture Notes in Computer Science. Vol 62. Pages 464-476. 1978.

[23] van der Velde, F. (1993). Is the brain an effective Turing machine or a finite-state machine? Journal of Psychological Research, 55(1):71 – 79.

[24] van der Velde, F. (2010). Where Artificial Intelligence and Neuroscience Meet: The Search for Grounded Architectures of Cognition. Advances in Artificial Intelligence, Volume 2010, (p1-18).

[25] von der Malsburg, C. (1981). The correlation theory of brain function.

[26] von der Malsburg, C. The what and why of binding: The modeler's perspective, Sept. 1999.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ESTIMACIÓN MONOCULAR Y EFICIENTE DE LA POSE USANDO MODELOS 3D COMPLEJOS

A. Rubio, M. Villamizar, L. Ferraz, A. Penate-Sanchez, A. Sanfeliu y F. Moreno-Noguer
Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC
Llorens Artigas 4-6, 08028 Barcelona, Spain

Resumen

El siguiente documento presenta un método robusto y eficiente para estimar la pose de una cámara. El método propuesto asume el conocimiento previo de un modelo 3D del entorno, y compara una nueva imagen de entrada únicamente con un conjunto pequeño de imágenes similares seleccionadas previamente por un algoritmo de "Bag of Visual Words". De esta forma se evita el alto coste computacional de calcular la correspondencia de los puntos 2D de la imagen de entrada contra todos los puntos 3D de un modelo complejo, que en nuestro caso contiene más de 100,000 puntos. La estimación de la pose se lleva a cabo a partir de estas correspondencias 2D-3D utilizando un novedoso algoritmo de PnP que realiza la eliminación de valores atípicos (outliers) sin necesidad de utilizar RANSAC, y que es entre 10 y 100 veces más rápido que los métodos que lo utilizan.

Palabras clave: Estimación de la pose · Robust Efficient Procrustes Perspective-*n*-point · Bag of Visual Words

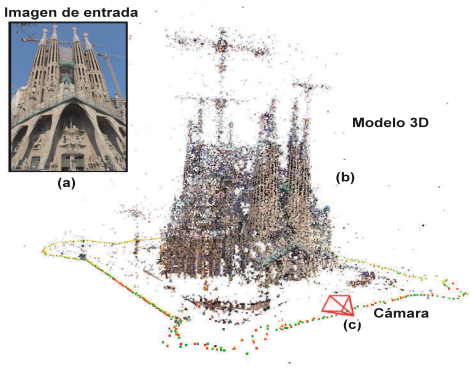


Figura 1: Definición del problema: Dada una imagen de entrada (a) y un modelo 3D del entorno conocido (b), el problema consiste en encontrar la pose de la camára que capturó la imagen con respecto al modelo (c). La principal dificultad que se aborda en este trabajo es realizar la correspondencia de puntos de forma eficiente y fiable para modelos 3D complejos, los cuales pueden tener una gran cantidad de puntos asociados. Para nuestro caso, el modelo de la Sagrada Familia contiene más de 100,000 puntos.

1. Motivación

El presente trabajo es una contribución científica al proyecto Europeo ARCAS [3], cuyo objetivo principal es el diseño y desarrollo de robots voladores para llevar a cabo tareas cooperativas de ensamblaje en entornos interiores y exteriores. Dentro de este proyecto también se aborda el desarrollo de los algoritmos de percepción, navegación y control necesarios para que estos vehículos áereos no tripulados puedan realizar las tareas de forma autónoma y segura.

Un elemento importante para realizar satisfactoriamente estas tareas corresponde con a la localización autónoma de los robots dentro de su entorno de trabajo. Este aspecto ha sido abordado en los últimos años desde diferentes puntos de vista. Por un lado se encuentran los sistemas basados en cámaras de infrarrojos y de alta frecuencia tales como el sistema VICON [31], el cual ha demostrado unos excelentes resultados para la localización y navegación de robots. No obstante, estos sistemas están limitados a entornos interiores donde las condiciones de iluminación estén controladas. Además, aparte de un alto coste, estos sistemas requieren la implantación de una red de cámaras dentro del entorno, hecho que restringe nuevamente el sistema a aplicaciones a escenarios estructurados.

Otra alternativa para localizar el robot de forma robusta es dotarlo de múltiples sensores, como por ejemplo cámaras estéreo o láseres, y realizar posteriormente una fusión de los datos provenientes de cada uno de ellos. Aunque estos sistemas aumentan la fiabilidad del robot, tienen un impacto negativo en su capacidad de carga y computacional. Esto es un aspecto muy crítico para ejecutar las tareas, especialmente en robots pequeños y de bajo coste.

Por el contrario, en este documento se propone un sistema eficiente y robusto basado simplemente en un cámara monocular y un modelo 3D del entorno conocido, como se muestra en la Fig. 1. En particular, el método propuesto es capaz de estimar la pose (rotación y traslación) de la cámara de manera rápida usando modelos altamente complejos que contienen un número muy alto de puntos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

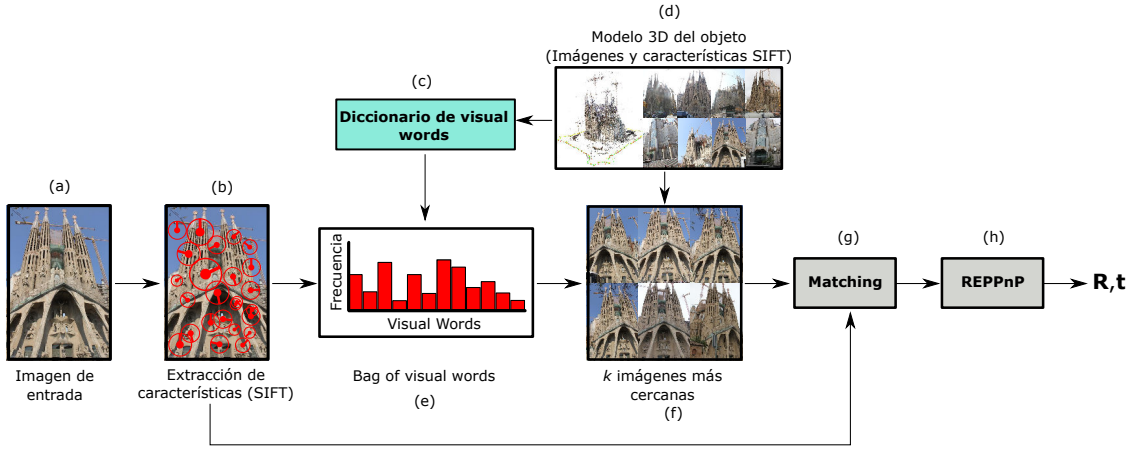


Figura 2: Diagrama general del método propuesto para estimar la pose de la cámara de forma eficiente y robusta con respecto a un modelo 3D conocido.

2. Introducción y estado del arte

El problema de la estimación de la pose de la cámara se ha abordado desde una gran cantidad de enfoques, desde la estimación basada en marcadores visuales [1, 4] hasta la utilización de técnicas 'menos invasivas' basadas en características o descriptores de la imagen [24, 27]. Este problema supone la base para numerosas aplicaciones en robótica y visión por computador, como la realidad aumentada o la fotogrametría [22].

El objetivo del problema Perspective-*n*-Point (P*n*P) es determinar la pose de la cámara (posición y orientación) a partir de un conjunto de n correspondencias 2D-3D conocidas entre la imagen y un modelo 3D. A pesar de haber sido estudiado durante más de un siglo (la primera solución data de 1841 [14]), recientemente la comunidad científica se ha esforzado en la búsqueda de alternativas precisas y eficientes para este problema.

En este contexto, múltiples métodos han resuelto el problema. No obstante, la mayoría de ellos presentan un alto coste computacional, alta sensibilidad al ruido o son válidos solamente para valores bajos de n. Entre estos métodos, cabe mencionar los diseñados para resolver el problema de P3P [18, 13], los métodos diseñados para valores grandes de n [8, 17, 15], los enfoques centrados en la reducción de complejidad [11], o los métodos más precisos, que son también los más complejos [2, 26].

La primera solución cerrada con coste *O(n)* fue el Efficient P*n*P [19, 23] (nombrado EP*n*P de aquí en adelante). La principal contribución de este método fue la introducción de unos puntos de control en 3D, reduciendo el problema a la estimación de su posición con técnicas de linearización. Trabajos posteriores han mejorado la precisión de este método a través de reformular el problema P*n*P original [16, 33, 32] y sustituir el enfoque lineal por soluciones polinomiales [20].

Para mejorar la robustez de EP*n*P en la estimación de la pose de la cámara, este método puede combinarse con una técnica para eliminar outliers, como por ejemplo RANSAC [12]. En aras de incrementar la eficiencia y evitar tareas con un elevado coste computacional, se ha seleccionado un método reciente que lleva a cabo el rechazo de outliers al mismo tiempo que estima la pose. Este método, llamado Robust Efficient Procrustes P*n*P (REPP*n*P) [9], reduce considerablemente el tiempo empleado en el proceso gracias a esta simultaneidad en los cálculos. La precisión de este método ha sido mejorada en [10] considerando la incerteza asociada a cada correspondencia.

En el presente trabajo se presupone la existencia de un modelo 3D conocido. Esto quiere decir que se conocen los descriptores de m puntos 3D. En el caso de estudio, estos descriptores son los SIFT [21] de los m puntos de interés, obtenidos a partir de un conjunto de imágenes de entrenamiento que se ha usado para la construcción del modelo. Así, los descriptores de una imagen de entrada serán comparados con los descriptores del modelo, obteniendo una serie de correspondencias entre puntos 2D y 3D. Este proceso puede conllevar un elevado coste computacional, ya que el número m de puntos 3D puede ser extremadamente alto (observar la Fig. 1).

A fin de evitar la comparación con un número excesivo de puntos, se ha añadido una etapa previa, consistente en un *Bag of Visual Words* (BoVW), un método de clasificación usado para obtener un cierto número k de imágenes similares a la de entrada. Refiérase a la Fig. 2. Estas imágenes provienen de las usadas para la construcción del modelo 3D. De este modo, se compararán los descriptores de ésta con los puntos 3D del modelo que aparecen únicamente en las k imágenes similares, aliviando notablemente el coste computacional.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En el resto del artículo se describen cada uno de los componentes del método que se propone. Primero se describe la construcción del modelo 3D y después el algoritmo de estimación de la pose, con sus dos partes principales: el bag of visual words, para obtener una primera estimación muy cruda de la pose, y el REPPnP, para el posterior refinamiento. Para evaluar el funcionamiento del método, finalmente se presenta una serie de experimentos con un modelo de la Basílica de la Sagrada Familia con $m = 100,532$ puntos. Obsérvese que calcular las correspondencias entre los puntos de una imagen de entrada y más de $100,000$ puntos de referencia al mismo tiempo que se eliminan outliers es un desafío de gran magnitud.

3. Construcción del modelo 3D

El modelo 3D de la Sagrada Familia se ha construido con el sistema *Bundler* [28], desarrollado para determinar la estructura de objetos o entornos a partir de movimiento y colecciones de imágenes desordenadas. Este algoritmo extrae los descriptores SIFT de un conjunto de N imágenes de un mismo escenario u objeto, para después buscar las correspondencias y construir a partir de ellas el modelo final, a la vez que se recuperan las poses desde donde fueron tomadas las imágenes.

Para la construcción de este modelo se utilizaron 478 imágenes, obteniendo un total de $100,532$ puntos. En la Fig. 1 (b) se muestra el modelo 3D recuperado, incluyendo en amarillo la pose recuperada por *Bundler* para cada una de las imagenes de entrenamiento, así como una imagen de entrada (Fig. 1 (a)) y la pose correspondiente de la cámara en rojo (Fig. 1 (c)). Para cada punto 3D del modelo, *Bundler* proporciona la siguiente información:

- Descriptor SIFT
- Coordenadas 3D
- Color RGB
- Imágenes en las que el punto aparece

La siguiente información sobre cada imagen también es devuelta por el programa:

- Matriz de calibración y factor de distorsión
- Matriz de rotación, $\mathbf{R}$
- Vector de traslación, $\mathbf{t}$

Esta información es usada como valor "ground truth" a la hora de evaluar la precisión del algoritmo.

4. Algoritmo de estimación de la pose

La Fig. 2 muestra el diagrama general de los pasos para determinar la pose de la cámara ($\mathbf{R}$ y $\mathbf{t}$) a partir de una imagen de entrada (Fig. 2 (a)). Como paso previo

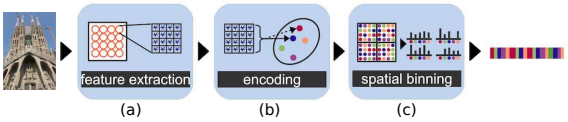


Figura 3: Pasos del algoritmo BoVW. Figura inspirada en [6].

y dado el conjunto de $N = 478$ imágenes usadas para construir el modelo, correspondiente a imágenes del escenario u objeto adquiridas desde diferentes puntos de vista, se crean dos subconjuntos disjuntos y equitativos de imágenes. Un subconjunto de entrenamiento usado para construir el diccionario de visual words (Fig. 2 (c)), y otro subconjunto conteniendo imágenes de prueba para evaluar el desempeño y la precisión del método propuesto. Por lo tanto, para evitar falsear los resultados, cuando se calcule la pose de una imagen de prueba se tendrán en cuenta únicamente los puntos del modelo 3D pertenecientes al conjunto de entrenamiento.

Una vez computado el diccionario de visual words, el siguiente paso consiste en calcular los descriptores SIFT (Fig. 2 (b)) sobre la imagen de entrada (perteneciente al conjunto de prueba). Estos descriptores son usados después para codificar la apariencia de la imagen mediante el cómputo del histograma de Bag of Visual Words (BoVW) (Fig. 2 (e)).

A continuación, este BoVW es usado para encontrar las imágenes más cercanas en el conjunto de entrenamiento. Esto se realiza mediante el algoritmo de k-vecinos más cercanos usando los histogramas de BoVW como muestras en un espacio multidimensional (Fig. 2 (f)). La ventaja de este enfoque como paso previo a la correspondencia de los puntos 2D-3D (Fig. 2 (g)), es que acota considerablemente la posible pose de la cámara, y por consiguiente, reduce el número de comparaciones entre los descriptores de la imagen de entrada y todos los m descriptores de modelo completo. Esto significa una reducción importante en el coste computacional de estimar la pose de la cámara para modelos complejos.

El último paso consiste en realizar el REPPnP (Fig. 2 (h)) con las coordenadas 2D de los descriptores SIFT de la imagen de entrada y los puntos 3D del modelo que aparecen en las k imágenes más cercanas para estimar la rotación $\mathbf{R}$ y la traslación $\mathbf{t}$ de la cámara con respecto al modelo 3D.

4.1. Bag of visual words (BoVW)

Como se ha mencionado anteriormente, el algoritmo de Bag of Visual Words en combinación con el algoritmo de k-vecinos más cercanos se usa para tener una primera aproximación de la parte del modelo que se ve en la imagen de entrada. En la Fig. 3 se observan los pasos realizados para computar el BoVW sobre una

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 1: Valores medios del método propuesto y de la comparacion con el modelo 3D completo.

	Modelo completo	$k = 6$	$k = 8$	$k = 12$	$k = 16$
Tiempo (s)	45,6694	12,3344	14,1634	16,9470	20,2644
Número de puntos 3D	100532	24855	29046	35422	43005
Número de puntos relacionados	470	424	436	447	452
Error de rotación	0,0061	0,0059	0,0135	0,0150	0,0056
Error de traslación	0,0231	0,0203	0,0323	0,0294	0,0208

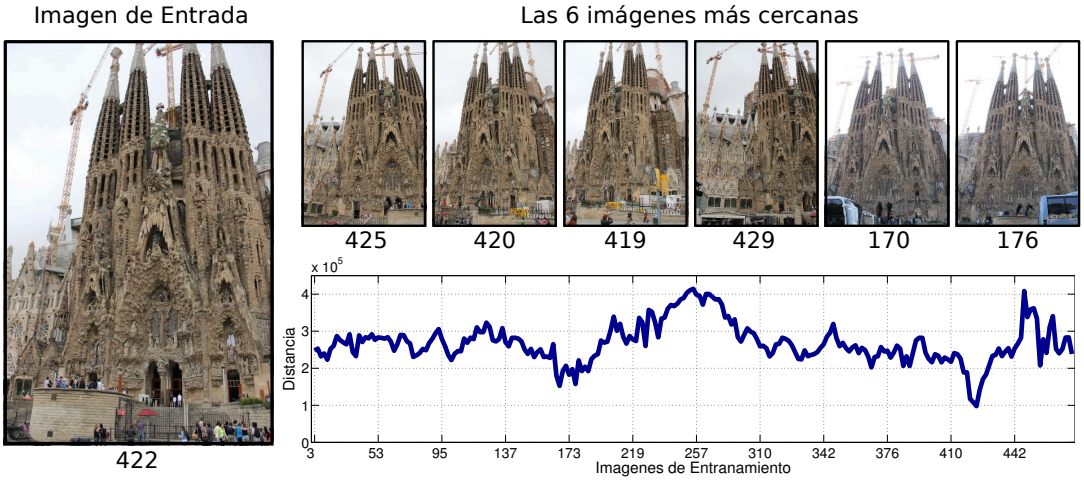


Figura 4: Imagen de entrada 1 (izqda.), imágenes similares según el BoVW ($k = 6$) y distancia a todas las imágenes de entrenamiento (abajo).

imagen de entrada. No obstante, es indispensable crear previamente un diccionario de visual words con el cual describir la apariencia de esta imagen de entrada. Más específicamente, este diccionario se genera agrupando los descriptores PHOW (Pyramid Histogram Of visual Words) [5] de las imágenes del conjunto de entrenamiento mediante el algoritmo *k-means*.

Los descriptores SIFT de la imagen de entrada (extraídos en una primera etapa, como se observa en la Fig. 3 (a)) se asignan a los correspondientes visual words del diccionario (fase de *encoding*, Fig. 3 (b)) por medio de cuantización VQ (que asigna cada SIFT al centroide de un visual word más cercano en distancia Euclídea) y por codificación Fisher [25]. Finalmente, tal como se recomienda en [29], se utilizan histogramas espaciales (Fig. 3 (c)) como forma de introducir en el proceso información espacial de la posición de las características dentro de la imagen.

Para el presente trabajo se ha computado un vocabulario con 100 visual words, dividiendo las imágenes en 8 histogramas espaciales.

4.2. Eliminación de outliers y estimación de la pose con REPPnP

El paso final del algoritmo presentado en este trabajo consiste en relacionar los puntos 2D de la imagen de entrada con los correspondientes puntos 3D del modelo a través de sus descriptores SIFT. Como ya ha sido mencionado en la sección 2, es frecuente valerse de métodos como el EPnP. Las soluciones clásicas del PnP asumen normalmente correspondencias 2D-3D corrompidas por ruido, pero no por puntos mal relacionados. Estos puntos (outliers) son rechazados habitualmente en una etapa previa por medio del RANSAC combinado con algoritmos P3P [18]. Estos enfoques implican el cálculo total de la pose y la reproyección de un gran número de puntos en cada iteración del método.

El REPPnP consiste en un método iterativo igualmente, pero que usa un criterio mucho más directo que el geométrico usado por los métodos previos. Este método considera el error algebraico del sistema lineal derivado de la formulación del PnP y demuestra convergencia con hasta un 50 % de outliers mientras reduce hasta 100 veces el tiempo empleado por las estrategias clásicas P3P-RANSAC-PnP.

Con el método propuesto se pasa de tener que comparar de forma exhaustiva los descriptores de la imagen de entrada contra todos los $100,532$ puntos 3D del modelo a comparar contra una cuarta parte de ellos (para $k = 6$), y encontrando de entre éstos más de 400 correspondencias 2D-3D de media. Los valores medios del número de puntos 3D que se consideran para la comparación y del número de correspondencias encontradas se muestran en el cuadro 1.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

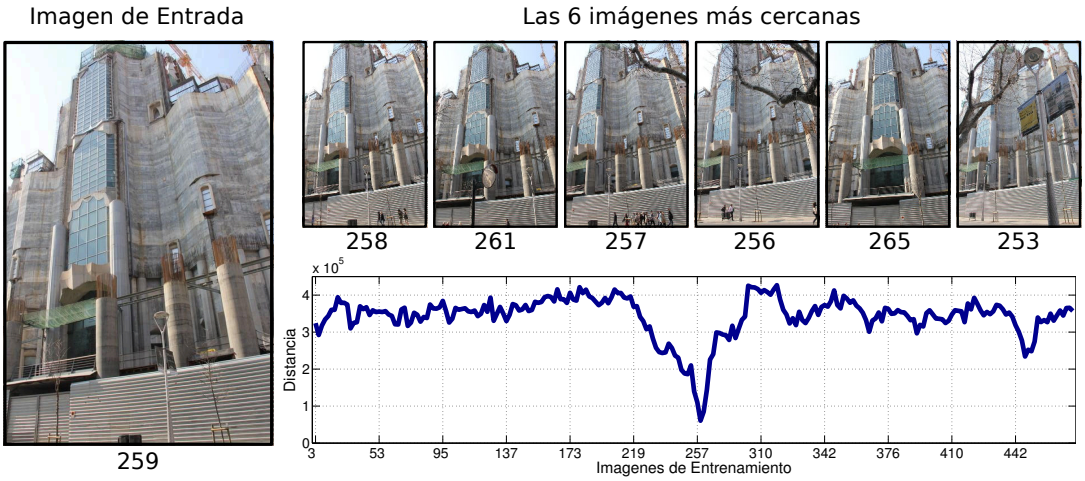


Figura 5: Imagen de entrada 259 (izqda.), imágenes similares según el BoVW ($k = 6$) y distancia a todas las imágenes de entrenamiento (abajo).

5. Resultados

En esta sección, la eficiencia y la precisión del método propuesto son evaluadas. Previamente, se estudia el desempeño del BoVW para la selección de imágenes similares.

5.1. Selección de imágenes similares

El desempeño del proceso de selección de imágenes similares usando el BoVW y el algoritmo k-vecinos más cercanos se muestra en las Fig. 4 y 5. En la parte izquierda se observa la imagen de entrada, mientras que en la parte derecha aparecen las 6 imágenes más cercanas de acuerdo con las distancias mostradas en la parte inferior. Nótese que las imágenes seleccionadas han sido adquiridas desde poses muy similares.

5.2. Eficiencia del método propuesto

El cómputo total del tiempo del proceso se desglosa en cinco componentes distintos: el tiempo que se tarda en seleccionar las imágenes más cercanas usando BoVW, el tiempo que se tarda en seleccionar los descriptores SIFT de esas imágenes que aparecen en el modelo 3D para la posterior comparación, el tiempo de extracción de los descriptores SIFT de la imagen de entrada, el tiempo usado para relacionar esos descriptores con los correspondientes del modelo 3D y, finalmente, el tiempo empleado por el algoritmo REPP*n*P para estimar la pose. Se ha medido también el tiempo que emplea el algoritmo RANSAC combinado con OP*n*P en estimar la pose tras la etapa de BoVW y k-vecinos más cercanos. Este último tiempo no forma parte del proceso propuesto y se incluye únicamente para comparar con la estrategia que se usa actualmente en los métodos del estado del arte. Cabe destacar que el OP*n*P ha sido presentado recientemente en [32], siendo uno de los algoritmos P*n*P más rapidos y precisos que existen.

Se han medido los tiempos de cálculo de cada una de las etapas del proceso para las 239 imágenes de entrenamiento. Los valores medios de esos tiempos se muestran en la tabla 1 y en la Fig. 6 (arriba izqda.). Se puede apreciar una reducción significativa de la duración del proceso de estimación gracias al enfoque de BoVW aplicado en la etapa previa. Otro hecho apreciable en las figuras es el aumento del tiempo con k, lo cual está directamente relacionado con el aumento del número de puntos comparados, como se explica a continuación.

La Fig. 6 (arriba izqda. y dcha.) muestra que el tiempo más relevante es el utilizado para relacionar los SIFT de la imagen de entrada con los del modelo (etapa de "*matching*"). La Fig. 6 (abajo izqda.) muestra el porcentaje en el cual se reduce este tiempo para distintos valores de k tomando como referencia el tiempo empleado en realizar dicha operación con el modelo completo. Este tiempo se reduce hasta en un 75 % (para $k = 6$) con el algoritmo propuesto dado que se pasa de comparar con 100,532 puntos a comparar con un número mucho menor. El cuadro 1 muestra el número de puntos 3D que aparecen en las imágenes seleccionadas por el BoVW (puntos considerados para relacionar con los de la imagen) y el número de estos puntos para los que se han encontrado correspondencias con los de la imagen de entrada para diferentes valores de k (valores medios para todas las imágenes de prueba).

Por otra parte se puede observar que las otras operaciones envueltas en el método propuesto tales como el cómputo de BoVW, la selección de SIFT, REPP*n*P o RANSAC combinado con OP*n*P muestran tiempos despreciables. Para una mejor visualización refiérase a la Fig. 6 (arriba dcha.) que muestra un zoom de los tiempos empleados.

Finalmente, en la Fig. 6 (abajo dcha.) se muestra una comparación de los tiempos empleados por REPPnP y RANSAC junto a OPnP para la estimación de la pose,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

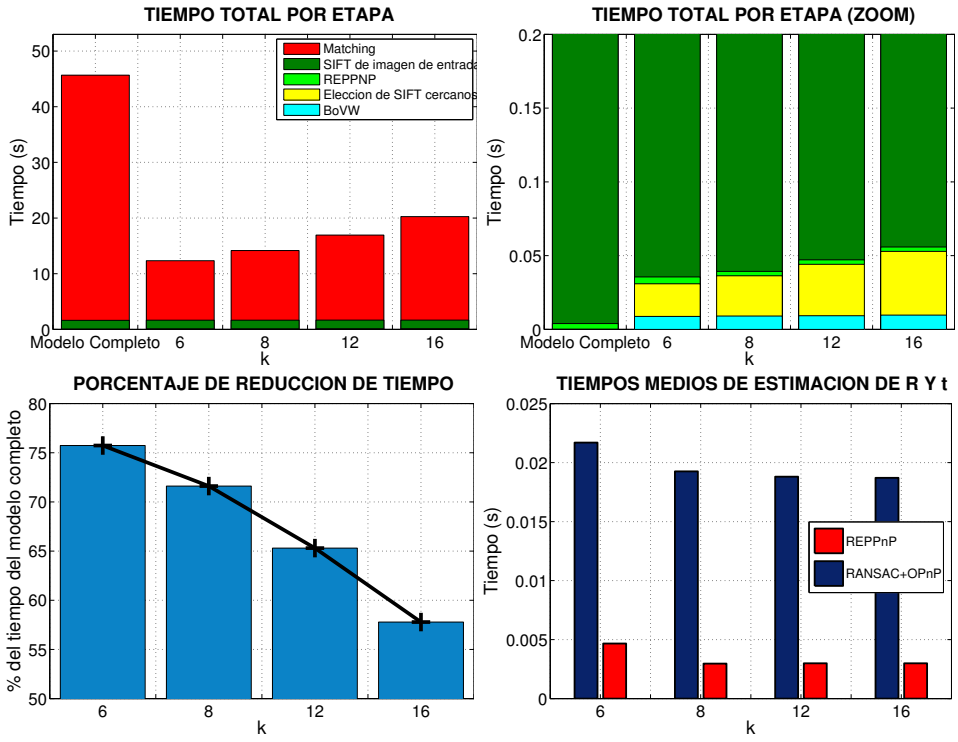


Figura 6: Análisis del tiempo de cálculo: Arriba-izquierda: Tiempos de cálculo del algoritmo propuesto para diferentes valores de k. El caso *modelo completo* es equivalente a $k = 1$ Obsérvese que la mayor parte del tiempo se invierte en calcular un conjunto inicial de correspondencias, entre las cuales aún puede haber outliers. Arriba-derecha: Zoom para una mejor visualización de los tiempos empleados para calcular el BoW y 'elegir los SIFT más cercanos'. Abajo-izquierda: Porcentaje de reducción de tiempo en la etapa de "*matching*" con respecto al modelo completo. Para $k = 6$, por ejemplo, se observa una reducción del 75 %. Abajo-derecha: Tiempo necesario para calcular la pose y eliminar outliers con REPPnP (usado en el artículo) y RANSAC+OPnP, que corresponde a la estrategia utilizada habitualmente. En media REPPnP ofrece un incremento de velocidad de hasta $10\times$.

en la cual se aprecia que el primer método reduce considerablemente la duración de este proceso. El tiempo empleado por ambos algoritmos se reduce al aumentar el valor de k.

5.3. Precisión del método propuesto

Con respecto a la precisión del método, el error de estimación se calcula como el error en la rotación (norma L_2 entre cuaterniones) y el error en la traslación (distancia Euclídea), ambos calculados tomando como "ground truth" la **R** y la **t** proporcionadas por el algoritmo *Bundler* mencionado en la sección 3. Como puede verse en la Fig. 7, para los valores de $k = 6$ y $k = 16$ el método mejora el error en la estimación al ser comparado con el uso del modelo completo con m puntos 3D. En el resto de experimentos realizados el error es algo mayor. No obstante, en todos los experimentos se observa una reducción muy significativa frente al error obtenido empleando RANSAC y OP*n*P.

En la Fig. 8 se observa la localización de los descriptores SIFT de la imagen de entrada y la reproyección de los puntos 3D asociados a esos descriptores, así como los errores de rotación y traslación asociados a cada método. La reproyección se ha llevado a cabo con las **R** y **t** obtenidas por medio del método propuesto con REPP*n*P y con las obtenidas con RANSAC combinado con OP*n*P. En dicha figura se presentan tres casos concretos para recalcar de nuevo las ventajas del uso del REPP*n*P. En todos ellos este método presenta una reproyección correcta, mientras que el RANSAC combinado con OP*n*P provoca reproyecciones erróneas para ciertas imágenes.

6. Conclusiones y trabajos futuros

La estimación de la pose de la cámara con respecto a un modelo de grandes dimensiones se ha acelerado notablemente gracias al BoVW para aproximar la región de la que proviene la imagen en un primer paso, y al mismo tiempo, el error en el resultado mejora con respecto al obtenido comparando con el modelo total para ciertos valores de k, por lo que simplificar el problema no provoca una pérdida de precisión. De ese modo, una reducción del 75 % en tiempo de cálculo es una ventaja importante a la hora de utilizar modelos formados por un elevado número de puntos.

Como trabajo futuro, el método propuesto puede ace-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

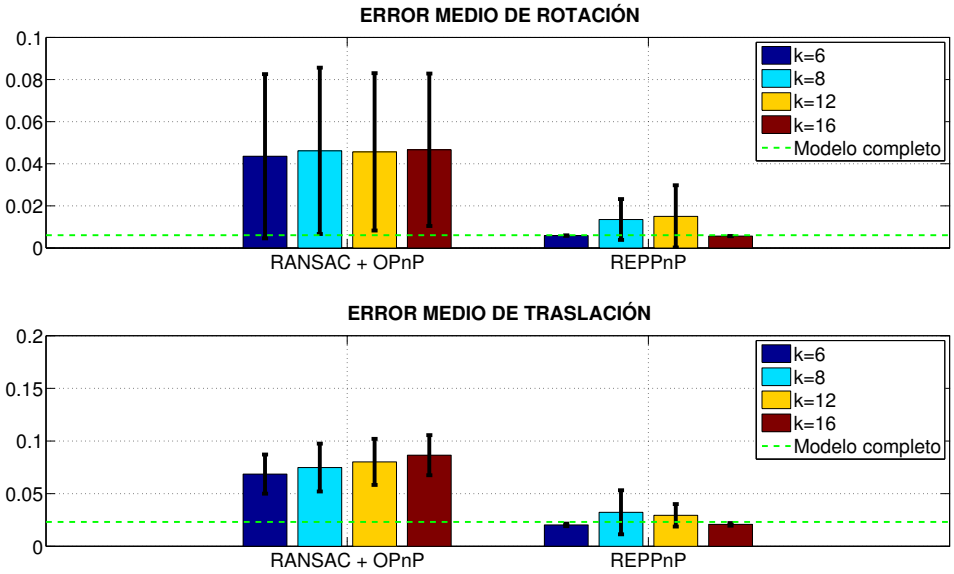


Figura 7: Error de rotación (gráfica superior) calculado como la norma L_2 entre cuaterniones y error de traslación (gráfica inferior) en la estimación de R para la comparación con el modelo completo y para diferentes valores de k.

lerarse aun más si se sustituyen los descriptores SIFT por algún otro tipo de descriptor más rápido (como BRIEF o FAST). También se considerará el uso de técnicas eficientes de detección basadas en árboles de decisión, boosting y descriptores binarios [34, 35, 36, 37] para estimar la pose inicial de la cámara a partir de la información de apariencia. Finalmente, también se trasladará la implementación del algoritmo de MATLAB a OpenCV y C++, con el objetivo de lograr estimación de la pose en tiempo real.

Agradecimientos

Este trabajo ha estado financiado en parte por los proyectos RobTaskCoop DPI2010-17112, ERA-Net Chistera ViSen PCIN-2013-047, y por el proyecto EU ARCAS FP7-ICT-2011-2876. Agradecemos tambien a Adrián Peñate la cesión del modelo 3D de la Sagrada Familia y los datos correspondientes provenientes de *Bundler*.

Referencias

[1] A. Amor-Martinez, A. Ruiz, F. Moreno-Noguer and A. Sanfeliu, On-board Real-time Pose Estimation for UAVs using Deformable Visual Contour Registration. In ICRA, 2014.

[2] A. Ansar and K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines. In PAMI, 2003.

[3] European project ARCAS: Aerial Robotics Cooperative Assembly System (www.arcas-project.eu).

[4] Biblioteca de realidad aumentada ARToolKit (http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/).

[5] A. Bosch, A. Zisserman and X. Munoz. Image classification using random forests and ferns. In ICCV, 2007.

[6] K. Chatfield, V. Lempitsky and A. Vedaldi and A. Zisserman. The devil is in the details: an evaluation of recent feature encoding methods. In BMVC, 2011.

[7] D. DeMenthon and L. Davis. Exact and approximate solutions of the perspective-three-point problem. In PAMI, 1992.

[8] M. Dhome, M. Richetin, J.T. Lapreste and G. Rives. Determination of the attitude of 3d objects from a single perspective view. In PAMI, 1989.

[9] L. Ferraz, X. Binefa and F Moreno-Noguer. Very Fast Solution to the PnP Problem with Algebraic Outlier Rejection. In CVPR, 2014.

[10] L. Ferraz, X. Binefa and F. Moreno-Noguer. Leveraging Feature Uncertainty in the PnP Problem, In BMVC, 2014.

[11] P.D. Fiore. Efficient linear solution of exterior orientation. In PAMI, 2001.

[12] M.A. Fischler and R.C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications ACM, 1981.

[13] X.S. Gao, X.R. Hou, J. Tang and H.F. Cheng. Complete solution classification for the perspective-three-point problem. In PAMI, 2003.

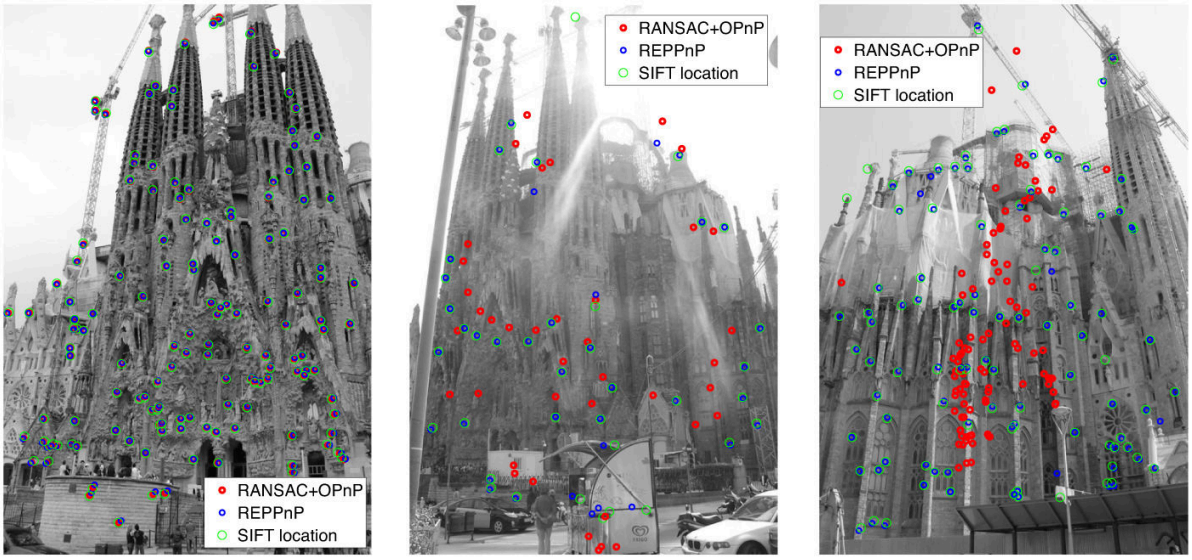
[14] J. A. Grunert. Das pothenotische problem in erweiterter gestalt nebst über seine anwendungen in geodäsie. In Grunerts Archiv für Mathematik und Physik, 1841.

[15] R.M. Haralick, D. Lee, K. Ottenburg and M. Nolle, M. Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. In CVPR, 1991.

[16] J.A. Hesch and S.I. Roumeliotis. A direct least-squares (DLS) method for P*n*P. In ICCV, 2011.

[17] R. Horaud, B. Conio, O. Leboulleux and B. Lacolle. An analytic solution for the perspective 4-point problem. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1989.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



Errores de Rotación					
REPnP:	0,0068	REPnP:	0,0042	REPnP:	0,0045
RANSAC+OPnP:	0,0007	RANSAC+OPnP:	0,0812	RANSAC+OPnP:	0,6845
Errores de Traslación					
REPnP:	0,0306	REPnP:	0,0109	REPnP:	0,0094
RANSAC+OPnP:	0,0383	RANSAC+OPnP:	0,1497	RANSAC+OPnP:	0,6825

Figura 8: Para 3 imágenes del conjunto de prueba: posiciones originales de los puntos SIFT de la imagen, y su reproyección con las **R** y **t** recuperadas por el algoritmo con REPPnP con $k = 6$ y con RANSAC + OPnP

[18] L. Kneip, D. Scaramuzza and R. Siegwart. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation. In CVPR, 2011.

[19] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, and P. Fua. Epnp: An accurate o(n) solution to the pnp problem. In IJCV, 2009.

[20] S. Li, C. Xu and M. Xie. A robust o(n) solution to the perspective-n-point problem. In PAMI, 2012.

[21] D. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In IJCV, 2004.

[22] C. McGlove, E. Mikhail and J. Bethel. (Eds.). Manual of photogrametry. American society for photogrammetry and remote sensing, 2004.

[23] F. Moreno-Noguer, V. Lepetit and P. Fua. Accurate noniterative o(n) solution to the pnp problem. In ICCV, 2007.

[24] F. Moreno-Noguer, V. Lepetit and P. Fua. Pose Priors for Simultaneously Solving Alignment and Correspondence. In ECCV, 2008

[25] F. Perronnin, J. Sanchez and T. Mensink. Improving the fisher kernel for large-scale image classification. In ECCV, 2010.

[26] L. Quan and Z. Lan. Linear N-point camera pose determination. In PAMI, 1999.

[27] E. Serradell, M. Özuysal, V. Lepetit, P. Fua and F. Moreno-Noguer. Combining Geometric and Appearance Priors for Robust Homography Estimation. In ECCV, 2010.

[28] N. Snavely, S.M. Seitz and R. Szeliski. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. In SIGGRAPH, 2006.

[29] S. Lazebnik, C. Schmid and J. Ponce. Beyond bags of features: Spatial pyramid matching for recognizing natural scene categories. In CVPR, 2006.

[30] A. Vedaldi and B. Fulkerson. *VLFeat*: An Open and Portable Library of Computer Vision Algorithms, 2008.

[31] www.vicon.com.

[32] Y. Zheng, Y. Kuang, S. Sugimoto, K. Aström and M. Okutomi. Revisiting the pnp problem: A fast, general and optimal solution. In ICCV, 2013.

[33] Y. Zheng, S. Sugimoto and M. Okutomi. Aspnp: An accurate and scalable solution to the perspective-n-point problem. Trans. on Information and Systems, 2013.

[34] M. Villamizar, A. Sanfeliu and J. Andrade-Cetto. Orientation invariant features for multiclass object recognition. In Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, 2006.

[35] M. Villamizar, A. Sanfeliu and J. Andrade-Cetto. Local boosted features for pedestrian detection. In Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, 2009.

[36] M. Villamizar, A. Garrell, A. Sanfeliu and F. Moreno-Noguer. Online human-assisted learning using random ferns. In ICPR, 2012.

[37] M. Villamizar, J. Andrade-Cetto, A. Sanfeliu and F. Moreno-Noguer. Bootstrapping boosted random ferns for discriminative and efficient object classification. In Pattern Recognition, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Alternativas de biología sintética para el control de rutas metabólicas

Pavel Zach[†], Alejandro Vignoni[‡], Daniel Georgiev[†], Jesús Picó[‡]
[†]CECYL Lab, Department of Cybernetics, Faculty of Applied Sciences, University of West Bohemia in Pilsen
Univerzitni 8,Pilsen 306 14, Czech Republic. Email: pzach@students.zcu.cz, georgiev@kky.zcu.cz
[‡]Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. Email:{alvig2, jpico}@upv.es

Resumen

Este trabajo intenta hacer hincapié en las alternativas que presenta la biología sintética y en como se pueden incluir en rutas metabólicas para mejorar la producción de metabolitos. Primero se presenta un análisis de una ruta metabólica interesante como la de la biosíntesis del triptófano. Luego hace un análisis de los procesos de regulación y introduce las posibles alternativas que aparecen con la biología sintética para reemplazar o mejorar la regulación y en definitiva la producción de metabolito en la industria biotecnológica. Finalmente se analizan las posibles implementaciones sintéticas para regular rutas metabólicas

Palabras clave: biología sintética, biotecnología, regulación de rutas metabólicas.

1. Introducción

La utilización de microorganismos para la producción de compuestos y metabolitos valiosos se convirtió en realidad después de la invención de diferentes técnicas para la síntesis de ADN y la transfección de ADN en células vivas. Estos métodos, tales como la digestión de restricción para cortar el ADN en lugares específicos, de ligadura de DNA para la unión de diferentes fragmentos de ADN, y la transfección de células para la introducción de un nuevo ADN en las células han permitido la ingeniería genética para convertirse en realidad.

En 1977, Genentech, Inc., informó de la producción de la primera proteína humana producida en bacterias, usando un gen recombinante sintético por primera vez. Sólo un año más tarde, en 1978, la misma compañía anunció una exitosa producción de insulina humana en una bacteria *Escherichia coli* [1]. En el tratamiento de la diabetes, esta insulina sintética sustituye la insulina animal, que era más difícil de obtener, por lo tanto más costosa y que estaba causando reacciones no deseadas en algunos pacientes. En este momento clave ha comenzado una nueva era de la biotecnología.

Mientras que la ingeniería metabólica añadió un enfoque sistemático, la biología sintética introduce otro nivel a la ingeniería de los circuitos genéticos y las vías metabólicas. Su objetivo es aplicar los principios de ingeniería, tales como la normalización, la modularidad y la reutilización de todas las piezas utilizadas, en última instancia, la creación de bibliotecas de piezas normalizadas bien caracterizados implicados en la regulación de la expresión génica.

Su atención se centra en la creación de circuitos genéticos o rutas metabólicas *de novo*, la exploración de nuevas opciones y nuevos diseños que no se pueden encontrar en la naturaleza. Esto significa una amplia necesidad de modelado computacional, acompañado por la comprensión de todos los procesos biológicos implicados y la capacidad de sintetizar nuevas partes de ADN a un precio razonable.

Tras más de 40 años de uso de métodos de ingeniería genética y metabólica en el desarrollo de productos comerciales, la biología sintética ha comenzado a extenderse en aplicaciones comerciales. Una de las primeras empresas industriales, que utilizan métodos de biología sintética en su producción, es la compañía de ciencias de la vida y los materiales DSM. Esta compañía utiliza biología sintética en la optimización de su proceso de síntesis y producción de antibióticos como la cefalexina [6]. Aunque el número de empresas de biotecnología que han utilizado técnicas de biología sintética para acelerar y mejorar su investigación es cada vez mayor, el máximo potencial todavía no se ha dado alcanzado.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: primero se presenta un análisis de una ruta metabólica interesante como la de la biosíntesis del triptófano en la Sección 2. Luego en la Sección 3 se hace un análisis de los procesos de regulación y a medida que van apareciendo se introducen las posibles alternativas que aparecen con la biología sintética para reemplazar o mejorar la regulación y en definitiva la producción de metabolito en la industria biotecnológica. En la Sección 4 se presenta al control en traducción como alternativa a la regulación de la transcripción y su utilidad para controlar rutas metabólicas. Finalmente se muestra un posible implementación, se revisa lo explicado y se proponen los trabajos futuros.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

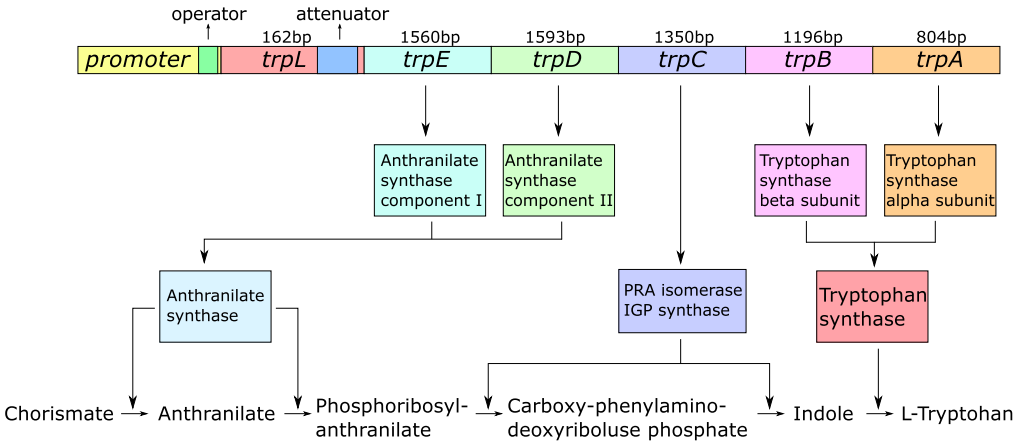


Figura 1: Esquema del operón *trp* y de la ruta de biosíntesis del triptofano.

2. Ruta metabólica para la biosíntesis del L-Triptófano

Las bacterias utilizan operones, conjuntos de genes regulados por el mismo promotor, para expresar conjuntamente las enzimas requeridas para la producción de metabolitos. Una de las rutas metabólicas mas estudiadas es la de la biosíntesis del aminoácido L-triptófano en la bacteria *E. coli*. A continuación se describen varios motivos que condujeron a su selección para nuestro estudio:

1. Es una de las rutas más estudiadas, tanto experimentalmente [21] como matemáticamente [3].
2. Incluye 3 bucles con realimentación negativa (ver Sección 3). Esto sugiere que la regulación es un elemento importante en los operones.

3. Biología y regulación

El operón *trp* codifica las enzimas necesarias para catalizar las etapas que conforman la la ruta metabólica de la biosíntesis del triptófano (Fig. 1).

El operón *Trp* incluye cinco genes (*trpE*, *trpD*, *trpC*, *trpB* y *trpA*), que son transcriptos en conjunto de izquierda (*trpE*) a derecha (*trpA*). Esta organización asegura que las enzimas que son necesarias al principio de la ruta se expresan primero. La transcripción del operón está controlada por dos bucles de realimentación negativa represión y atenuación. Además, un tercer bucle regula en forma de inhibición alostérica de la enzima. Estos tres bucles se observan en la Fig. 2.

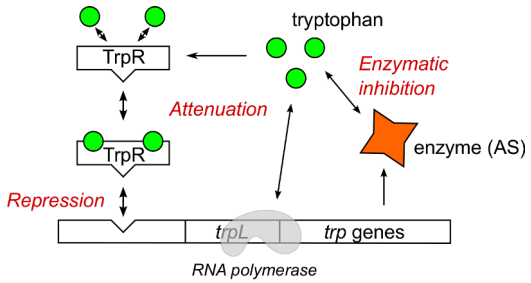


Figura 2: Mecanismos de control en el operón *trp*.

3.1. Represión de la transcripción

La represión a nivel de transcripción, se produce en el caso del operón Trp a través de la proteína TrpR, que funciona como factor de transcripción cuando se dimeriza. La proteína TrpP es codificada por el gen *trpR*, que no se encuentra adyacente al operón, sino en otro lado y controlado por un promotor moderado, pero autorregulado por la proteína TrpR [8]. Cuando en la célula hay

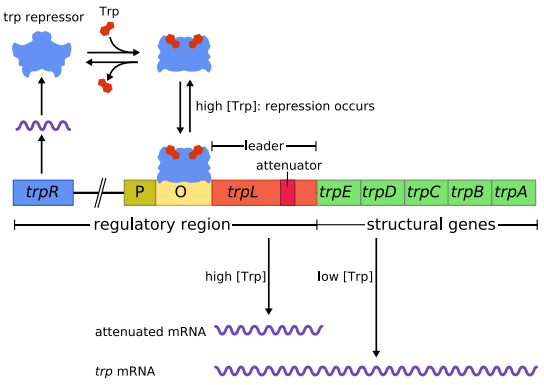


Figura 3: Mecanismo de represión en el operón *trp*.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

triptófano en concentraciones bajas, la proteína TrpR se encuentra en su forma inactiva y no se puede unir al sitio operador del promotor del operón *trp* (ver Fig. 3). Así, se permite a la RNA polimerasa iniciar la transcripción de los genes del operón, incrementando el nivel de concentración de las enzimas que participan en la ruta metabólica de síntesis del triptófano, elevando a su vez, el nivel de triptófano en la célula. Cuando el nivel de triptófano es suficiente, el exceso de triptófano se une cooperativamente al represor TrpR (necesitándose 2 moléculas de triptófano por represor) permitiendo que el represor activado se una de forma no-cooperativa al operador y así inhibiendo la transcripción de los enzimas, lo que a su ves contribuye a disminuir el nivel de producción de triptófano [13].

Este mecanismo regula el operón *trp* permitiendo un cambio del orden de 100 veces en su nivel de expresión [22] y depende de la concentración intracelular del triptófano [15].

Alternativas de la Biología Sintética Para regular la expresión del operón utilizado un bucle con realimentación negativa, se puede incorporar una proteína represora que sea expresada por alguno de los genes del operón. La proteína en cuestión debe reconocer una secuencia en el promotor del operón (llamada región del operador) determinando la especificidad de la represión. Esto es, para generar una realimentación negativa, se debe elegir un tendem especifico promotor - gen. Si bien en la naturaleza existen varios represores bien caracterizados (como por ejemplo el represor LacI y el correspondiente promotor pLac [2]), no son demasiados. Esta limitación puede resolverse con el uso de los efectores *Transcriptional Activator Like* (Efectores TAL o TALE).

Los Efectores TAL fueron descubiertos en 2009 en las bacterias *Xanthomonas* que los utilizan cuando infectan ciertas especies de plantas [11]. El propósito de estas proteínas es modular la transcripción en las plantas huéspedes para promover la infección bacteriana, siendo su principal característica el dominio central donde se repiten 34 aminoácidos iguales.

Este dominio central es capaz de reconocer y unirse a una secuencia específica de ADN, basándose en la identidad critica de dos aminoácidos en cada una de las repeticiones. Como existe una relación conocida entre estos aminoácidos y las secuencias de nucleótidos que reconocen (ver Fig. 4), estas proteínas se pueden utilizar fácilmente para diseñar unirse a regiones deseadas del DNA y así convertirse en efectores TAL. Asimismo estas proteínas pueden diseñarse para funcionar como represores y dar lugar a un bucle de realimentación negativa. Sin embargo, el uso general de factores de transcripción (ya sean naturales o diseñados sintéticamente como los TALEs) tienen una desventaja con respecto al control presente en el operón *trp*: La realimentación se produce desde la enzima y no del metabolito en cuestión.

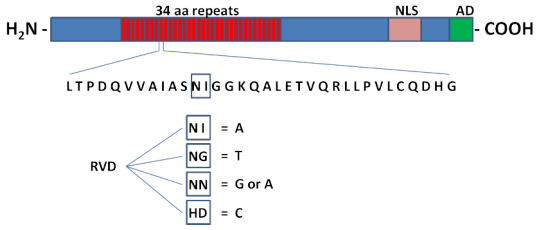


Figura 4: Esquema de un efector TAL. Los amino acidos NI repetidos en el dominio central reconocen al nucleótido Adenina.

3.1.1. Atenuación

La atenuación transcripcional por otro lado, es un mecanismo para la terminación prematura de la transcripción, basada en el acoplamiento entre transcripción y traducción en procariotas. Este proceso fue descubierto en operones similares de *E. coli* y otros procariotas [13] y consiste en una secuencia corta, ubicada entre el promotor y los genes estructurales del promotor (en la UTR 5').

En el operón *trp*, esta secuencia es de 162bp de largo y es una región que se encuentra liderando a los genes del operón *trpL* (ver Fig. 1) [21]. Esta región contiene cuatro secuencias numeradas del 1 al 4 de izquierda a derecha. Cada una de estas secuencias es parcialmente complementaria a la siguiente, con lo cual una vez transcriptas, el ARN se pueden plegar en tres diferentes estructuras secundarias (horquillas) 1-2, 2-3, y 3-4. Sin embargo, el ARN transcripto solamente puede adoptar dos conformaciones: la conformación terminador y la anti-terminador:

- **Terminador** - este caso sucede cuando se forma la estructura 3-4 y solo puede suceder cuando la secuencia 3 no está apareada con la 2, es decir, la secuencia dos debe estar apareada con la 1, o bien secuestrada por un ribosoma.
- **Anti-terminador** - este caso sucede cuando la estructura 3-4 no se forma, formándose así el complejo 2-3. A su vez esto solo puede suceder cuando la secuencia 2 se encuentra disponible por no formar parte del complejo 1-2.

La conformación final depende de la concentración intracelular de triptófano. El mecanismo por el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cual la atenuación regula la transcripción se muestra en la figura 5. En primer lugar, RNAp comienza con la transcripción de la región líder con las secuencias 1 y 2. Casi inmediatamente después de que se transcribe esta secuencia, los ribosomas se unen al ARN y comienza con la traducción. Si la concentración de triptófano es baja, el ribosoma se para en la secuencia 1 que tiene dos codones consecutivos de Trp. Este bloqueo de la formación de complejo de 1-2 permite la formación de la conformación anti-terminación (Fig. 5b).

De lo contrario, si la concentración de triptófano es alta, la secuencia 2 es secuestrada 2 en lugar de la secuencia de 1, por lo que la conformación terminador se puede formar (Fig. 5a), lo que no permite la transcripción de los genes restantes del operón. Este mecanismo regula la expresión del operón *trp* en un intervalo de 6 a 8 veces [22].

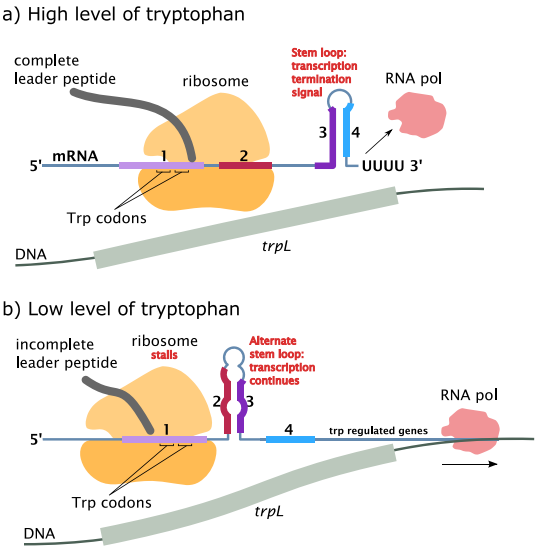


Figura 5: Mecanismo de atenuación presente en el operón *trp*.

Alternativas de la Biología Sintética La alternativa de la biología sintética para los atenuadores son los *riboswitches* transcripcionales. Según [12], los riboswitches transcripcionales pueden ser considerados como una clase especial de atenuadores, aunque algunos autores consideran a los riboswitches como un grupo separado. La principal diferencia entre atenuadores y riboswitches es en el elemento de detección de ARN. En los atenuadores, esta parte es un elemento general de la detección de una variedad de entradas (por ejemplo, proteínas, temperatura), mientras que en riboswitches, esta parte se llama aptámero y es a la que se unen diferentes moléculas pequeñas (llamadas ligandos). Después de la parte del aptámero, el riboswitch consiste en una plataforma de expresión que realiza una acción específica cuando se le une un ligando (Ver Fig. 6). Esta acción puede ser la formación de un terminador o la formación de un anti-terminador que permite la transcripción de los genes aguas abajo.

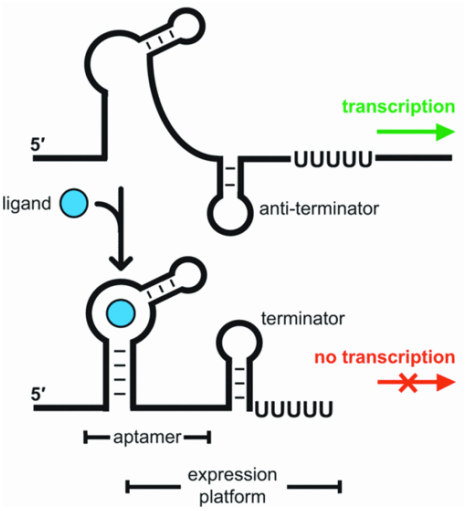


Figura 6: Mecanismo de losriboswitches transcripcionales. En este caso, un ligando se une al aptámero y se forma terminador, por lo tanto la transcripción se detiene [9].

El descubrimiento y caracterización de estos elementos reguladores basados en ARN se produjo en 2002, cuando se publicó el primer estudio exhaustivo [19]. Desde entonces, muchos riboswitches naturales fueron descubiertos y una gran cantidad de trabajo se ha hecho en el estudio de su mecanismo.

El problema de ingeniería riboswitches sintéticos puede ser generalmente dividido en dos partes separadas:

1. **Diseño del Aptámero** prácticamente todos los métodos para la obtención de un nuevo aptámero se basan en un método llamado SELEX (evolución sistemática de ligandos por enriquecimiento exponencial). Este método consiste en la generación de un gran número de secuencias de ARN aleatorias (hasta 10^{14}), y su mezcla con ligandos diana inmovilizados. Después del lavado, las secuencias unidas se eluyen, son amplificadas por PCR[1] Y se someten a más rondas de este proceso de selección. Después de cada iteración se encuentran

[1] reacción de polimerasa en cadena.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

aptámeros con mayor afinidad (capacidad de enlazado con el ligando) [20].

2. **Diseño de la plataforma de expresión** - implica el diseño de una secuencia de ARN, que altere su estructura secundaria cuando un ligando se une al aptámero. Por lo tanto esta secuencia se puede dividir en dos partes - módulo que realiza el cambio deseado en su estructura secundaria, y del módulo de comunicación, que sirve como una interconexión entre un aptámero y este módulo[16].

Por desgracia, hay algunas limitaciones en el diseño de nuevos riboswitches. En primer lugar, los aptámeros obtenidos por el procedimiento SELEX son aptámeros que funcionan *in vitro*. Sin embargo, a menudo presentan una reducida funcionalidad *in vivo*, debido principalmente a una concentración diferente de iones *Mg*. Además, se ha conseguido poco éxito en el diseño de plataformas de expresión para riboswitches transcripcionales, debido a interacciones más complicadas entre la molécula de ARN producido. Sin embargo, esta situación ha comenzado a cambiar, ya que en 2013 algunos autores reportaron diseño *de novo* de riboswitches sintéticos que regula la terminación de la transcripción [17],[5].

3.1.2. Inhibición enzimática

El tercer mecanismo de regulación en la biosíntesis de triptófano no influye en el proceso de la transcripción de las enzimas implicadas, sino que se dirige a su actividad, específicamente la actividad de la sintetaza de antranilato (AS), un heterotetrámero formado por dos TrpE y dos polipéptidos TrpD [15]. Esta enzima cataliza la primera etapa de la vía que conduce a la producción de triptófano. Si la concentración de triptófano es alta, se une a la AS, causando la inhibición alostérica de su actividad y por lo tanto disminuyendo su producción.

Alternativas de la Biología Sintética
Aunque se están realizando avances significativos en el campo de la ingeniería de proteínas todos los años, ena el conocimiento del autor, no existen métodos que permitan el diseño de nuevas enzimas, o rediseño racional de las enzimas existentes (con el fin de introducir este tipo de inhibición). El estado actual de la ingeniería de proteínas en la biología sintética implica incremento de la actividad, la alteración de la especificidad de proteínas y la modificación de los elementos reguladores de proteínas (principalmente eliminación de la inhibición alostérica destruyendo el sitio específico mediante mutagénesis dirigida [4] o por evolución dirigida) [7].

4. Control en traducción como alternativa a la regulación de la transcripción

Uno de los mecanismos de regulación utilizado en la biología sintética que no está implicado en la regulación de operón *trp* son los riboswitches. Este mecanismo funciona en un nivel de traducción.

Los riboswitches de traducción se basan en el mismo principio que los riboswitches para control de la transcripción. También tienen un aptámero y una plataforma de expresión (véase la Sección 3.1.1), que cambia su conformación con la unión del ligando. La diferencia es que riboswitches de traslación sólo secuestran o liberan al sitio RBS en el ARNm, utilizando generalmente emparejamiento simple (ver Fig. 7).

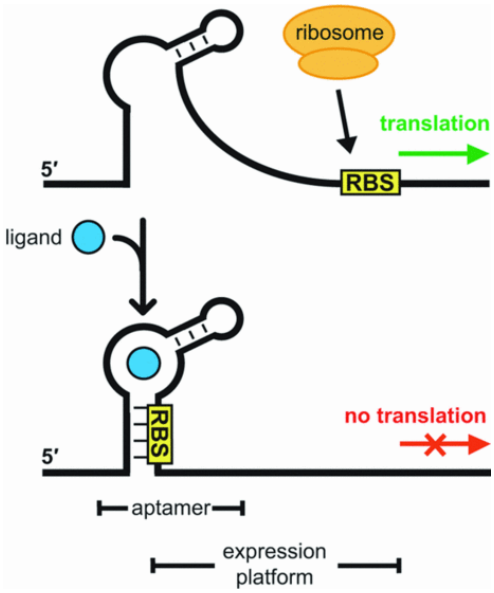


Figura 7: Mecanismo de los riboswitches traduccionales. En este caso, luego de la unión del ligando al aptamero, el sitio del RBS es secuestrado, por tanto, el ribosoma no puede unirse y empezar la traducción. Imagen original tomada de [9].

Dado que no se forman estructuras secundarias complejas, el diseño de estos elementos es más simple que el de los riboswitches transcripcionales [17], [10], y muchos riboswitches artificiales han sido diseñados [16]. Desventaja de su uso en el control de la expresión de genes en operones es que una molécula de ARNm completo se produce siempre. Esta producción genera una carga innecesaria para la célula.

Una desventaja es que un riboswitch de traducción sólo puede regular la traducción de los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

genes a continuación de un solo RBS (véase la fig. 8). Esta regulación es plausible para operones como el operón *trp*, donde un solo RBS controla todos los genes mediante la superposición de codones (último nucleótido del codón de parada es también el primer nucleótido del codón de inicio (ver fig. 8) y [14]). La mayoría de los operones existentes, sin embargo, son controlados por múltiples RBS, uno para cada gen [18].

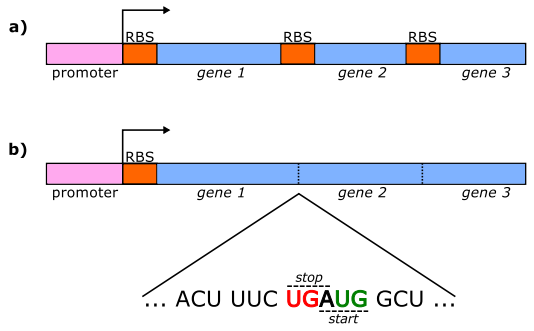


Figura 8: a) Estructura común del operón - cada gen tiene su propio RBS. b) operón con una sola RBS para todos los genes (ejemplo de ello es la operón *trp*). En este caso, un ribosoma puede traducir todos los genes a la vez sin salir del ARNm. Cuando el ribosoma encuentra el codón de parada, también detecta codón de inicio del próximo gen.

5. Discusión: Posible implementación de un control sintético de ruta metabólica

Utilizando la alternativas propuesta en la seccion anterior, se analizan las diferencias entre las diferentes entradas del controlador, es decir si se realimenta informacion de las enzimas, de los metabolitos o de ambos. A continuación se propone un modelo simple:

$$\frac{dM}{dt} = k_1 C_1(E) - (k_{d2} + \mu)M, \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = k_3 C_2(P)M - \mu E, \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = k_4 E - \mu P. \quad (3)$$

Estas ecuaciones se refieren a la transcripción de ARNm (M) a partir del operón (1) y la producción de una enzima (E) (2) que cataliza la formación de un producto/metabolito (P) (3). Los valores por defecto para todos los parámetros se tomaron del modelo del operón *trp* y se pueden encontrar en el Tabla 1. Funciones $C_1(E)$ y $C_2(P)$ se define como

$$C_1(E) = \frac{K_1^{n_1}}{K_1^{n_1} + E^{n_1}}, \quad (4)$$

$$C_2(P) = \frac{K_p}{K_p + P}. \quad (5)$$

La función C_1 incorpora el efecto de la represión genética de la enzima producida, la función C_2 incorpora el efecto de la represión de traducción desde un riboswitch (por lo tanto la entrada del controlador C_2 es la concentración de metabolitos, mientras que la entrada del regulador a C_1 es la concentración de la enzima). Los parámetros k_1 y n_1 fueron nuevamente tomados de la Tabla 1, mientras que el parámetro K_p se fijó a 10μM. Tres diseños diferentes se compararon utilizando los controladores individuales C_1, C_2, y su combinación.

En esta comparación (Fig. 9), el parámetro k_1 en el modelo con el controlador C_1 se redujo a $k_1 = 3$ min^{-1}. Para otros dos modelos, parámetros k_1 y k_3 estaban sintonizados con el fin de obtener el mismo nivel de estado estable del metabolito. Estos parámetros fueron escogidos porque son sintonizables fácilmente en sistemas reales (promotor y RBS fuerza). EL tiempo de simulación fue de 3 horas. En el momento $t = 70$min, después de todos los modelos llegan a su estado de equilibrio, el parámetro k_4 fue perturbado, incrementándolo dos veces, con una duración de una hora. Esta perturbación puede ser causada en sistemas reales por un aumento repentino de una concentración de sustrato, una adición de un metabolito al medio o por un cambio en la actividad enzimática.

Los tres diseños muestran sobre-pico en el transitorio de los niveles de enzima. Ante la perturbación en el parámetro k_4, podemos observar que los niveles de la enzima del diseño con riboswitch no han cambiado. Esto es predicho por el modelo, ya que la realimentación rechaza cambios en la concentración de metabolito. El nivel de metabolito para este diseño está en concordancia con este comportamiento: el nuevo estado de equilibrio es tres veces mayor.

Los otros dos diseños tienen una retroalimentación derivada directamente de los niveles de metabolitos. Como puede verse, el diseño único riboswitch supera a la combinada en términos de sensibilidad a la perturbación introducida - Diseño riboswitch muestra el cambio de 1,7 veces en su estado de equilibrio metabolito, el diseño por su parte combinada muestra el cambio de $2,3$ veces. Esto se

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

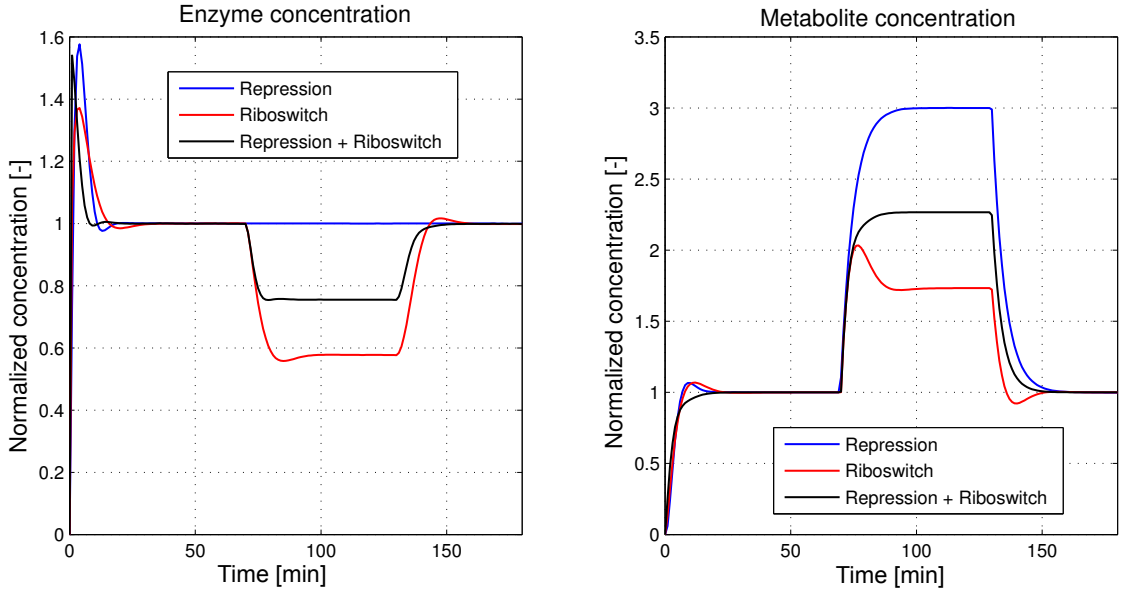


Figura 9: Comparativa de tres diseños sintéticos diferentes para el control de operones. *Represión* es un diseño que utiliza solo el controlador C_1, el diseño *riboswitch* incluye solo el controlador C_2 y finalmente el diseño *represión + riboswitch* combina ambos controladores.

puede explicar por los respectivos niveles de la enzima - aunque estos niveles se redujeron a la inducción, el diseño combinado a mantener los niveles más altos. Esto es debido al hecho de que en este diseño, cuando se introduce la perturbación, el controlador C_2 actúa para reducir el nivel de los enzimas. Este cambio en la concentración enzimática es observado por el controlador C_1, que trata de compensar esta pérdida.

Tabla 1: Tendencia de los parámetros optimizados para el circuito sintético de 3 nodos. Los parámetros k_d y d_{Ie} fueron fijados de acuerdo a la naturaleza del modelo.

Parameter	Description	Value
k_1	Free operator synthesis rate	50 min^{-1}
k_2	Transcription rate	5.1 min^{-1}
k_3	Translation rate	20 min^{-1}
k_4	Tryptophan synthesis rate	59 min^{-1}
k_{d1}	Free operator degradation rate	0.5 min^{-1}
k_{d2}	mRNA degradation rate	0.96 min^{-1}
k_{d3}	Enzyme degradation rate	0 min^{-1}
K_1	Repression's dissociation constant	3.53 μM
K_2	Attenuation's dissociation constant	0.04 μM
K_3	Enzyme inhibition's dissociation constant	4.1 μM
n_1	Repression's Hill coefficient	1.92
n_2	Attenuation's Hill coefficient	1.72
n_3	Enzyme inhibition's Hill coefficient	1.2
g	Tryptophan uptake kinetic rate	25 μMmin^{-1}
K_g	Tryptophan uptake's dissociation constant	0.2 μM
O_t	Total operator concentration	0.00332μM
μ	Cell growth rate	0.01 min^{-1}
d	Tryptophan adsorption constant	23.5 μMmin^{-1}
e	Parameter in the Trp intake expression	0.9 μM
f	Parameter in the Trp intake expression	380 μM

6. Conclusión

Para controlar rutas metabólicas se pueden hay distintas opciónes, y como se ha visto la biología sintética ofrece varias alternativas a las implementaciones originales. Algnas de estas alternativas, como el control en traducción como alternativa a la regulación de la transcripción, presentan características interesantes, que pueden ser rescatadas a la hora de buscar una solución de biología sintética a problemas de biotecnología. De este modo la biotecnología a ido avanzando a partir de los nuevas tecnologías que han ido apareciendo, siendo la aplicación de alternativas de biología sintetica la ma llamativa, ya que propone un control al nivel genético y molecular de un problema macroscópico como puede ser la optimización de un bioproceso de producción.

En este trabajo se han revisado estas alternativas a partir del análisis de una ruta metabólica modelo como lo es la de biosíntesis del L-triptófano. En la actualidad, en el grupo de colaboración, se esta trabajando en la implementación en circuitos biológicos in vivo de las técnicas presentadas, con vistas de mejorar procesos biotecnológicos y optimizar rutas metabólicas.

Agradecimientos

Agradecemos al Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España (FEDER-CICYT DPI2011-28112-C04-01), el apoyo de la University of West Bohemia en Pilsen y del Dr. Guillermo Rodríguez del CSIC.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] First successful laboratory production of human insulin announced. in: *Genentech: Press Releases* [online]. 1978. `http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm`. Accessed: 2014-04-16.

[2] Laci regulated promoter. in: Registry of standard biological parts [online]. 2003.

[3] Sharad Bhartiya, Nikhil Chaudhary, KV Venkatesh, and Francis J Doyle. Multiple feedback loop design in the tryptophan regulatory network of escherichia coli suggests a paradigm for robust regulation of processes in series. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(8):383–391, 2006.

[4] Paul Carter. Site-directed mutagenesis. *Biochemical Journal*, 237(1):1, 1986.

[5] Pablo Ceres, Jeremiah J Trausch, and Robert T Batey. Engineering modular on rna switches using biological components. *Nucleic acids research*, page gkt787, 2013.

[6] Brent Erickson, Rina Singh, and Paul Winters. Synthetic biology: regulating industry uses of new biotechnologies. *Science*, 333(6047):1254–1256, 2011.

[7] Jee Loon Foo, Chi Bun Ching, Matthew Wook Chang, and Susanna Su Jan Leong. The imminent role of protein engineering in synthetic biology. *Biotechnology advances*, 30(3):541–549, 2012.

[8] Richard L Kelley and Charles Yanofsky. Trp aporepressor production is controlled by autogenous regulation and inefficient translation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(10):3120–3124, 1982.

[9] Jane N Kim and Ronald R Breaker. Purine sensing by riboswitches. *Biology of the Cell*, 100(1):1–11, 2008.

[10] Chang C Liu, Lei Qi, Julius B Lucks, Thomas H Segall-Shapiro, Denise Wang, Vivek K Mutalik, and Adam P Arkin. An adaptor from translational to transcriptional control enables predictable assembly of complex regulation. *Nature methods*, 9(11):1088–1094, 2012.

[11] Matthew J Moscou and Adam J Bogdanove. A simple cipher governs dna recognition by tal effectors. *Science*, 326(5959):1501–1501, 2009.

[12] Magali Naville and Daniel Gautheret. Transcription attenuation in bacteria: theme and variations. *Briefings in functional genomics & proteomics*, 8(6):482–492, 2009.

[13] Lan K Nguyen and Don Kulasiri. On multiple regulatory mechanisms in the tryptophan operon system in escherichia coli: in silico study of perturbation dynamics. *In silico biology*, 8(5):485–510, 2008.

[14] Daniel S Oppenheim and Charles Yanofsky. Translational coupling during expression of the tryptophan operon of escherichia coli. *Genetics*, 95(4):785–795, 1980.

[15] Moisés Santillán and Eduardo S Zeron. Dynamic influence of feedback enzyme inhibition and transcription attenuation on the tryptophan operon response to nutritional shifts. *Journal of theoretical biology*, 231(2):287–298, 2004.

[16] Beatrix Suess, Barbara Fink, Christian Berens, Régis Stentz, and Wolfgang Hillen. A theophylline responsive riboswitch based on helix slipping controls gene expression in vivo. *Nucleic acids research*, 32(4):1610–1614, 2004.

[17] Manja Wachsmuth, Sven Findeiß, Nadine Weissheimer, Peter F Stadler, and Mario Mörl. De novo design of a synthetic riboswitch that regulates transcription termination. *Nucleic acids research*, 41(4):2541–2551, 2013.

[18] James D Watson et al. *Molecular biology of the gene.* Benjamin Cummings, San Francisco, 5th edition, 2004.

[19] Wade C Winkler and Ronald R Breaker. Genetic control by metabolite-binding riboswitches. *Chembiochem*, 4(10):1024–1032, 2003.

[20] Alexander Wittmann and Beatrix Suess. Engineered riboswitches: expanding researchers toolbox with synthetic rna regulators. *FEBS letters*, 586(15):2076–2083, 2012.

[21] Ch Yanofsky, T Platt, IP Crawford, BP Nichols, GE Christie, H Horowitz, M VanCleemput, and AM Wu. The complete nucleotide sequence of the tryptophan operon of escherichia coli. *Nucleic acids research*, 9(24):6647–6668, 1981.

[22] Charles Yanofsky and Virginia Horn. Role of regulatory features of the trp operon of escherichia coli in mediating a response to a nutritional shift. *Journal of bacteriology*, 176(20):6245–6254, 1994.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Uso de Simulink y Arduino para Prácticas de Robótica

J.E. Gil Lozano, A.J. Muñoz Ramírez, V. Torres López, y J.M. Gómez de Gabriel

Dto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Málaga
je.gil.lozano@gmail.com, {ajmunoz, vetorres, jmgomez}@uma.es

Resumen

En éste artículo se presenta el diseño de un equipo y un conjunto de prácticas para la docencia en asignaturas de robótica, mediante el uso de Simulink y los microcontroladores Arduino. Se han diseñado y construido un conjunto de plataformas móviles con un microcontrolador y se ha evaluado su rendimiento y la facilidad del uso de Simulink con las librerías de soporte de Arduino para su uso docente en grados de ingeniería.

Palabras clave: Docencia, Arduino, Robótica, Simulink.

1. Introducción

El aprendizaje basado en proyectos es un método de enseñanza que implica a los estudiantes en la resolución de problemas de ingeniería reales [10]. Para que sea eficaz, el profesor debe identificar un problema de una extensión adecuada y con una dificultad suficiente para estimular el proceso de aprendizaje. Si además, el proyecto está apoyado con equipos físicos, frente a los modelos de simulación, se proporciona al alumno una versión completa del problema a resolver, en lugar de limitar su trabajo a un modelo simplificado, a la vez que aumenta su motivación [11]. Desafortunadamente, muchos sistemas de desarrollo hardware son complejos y distraen al alumno y al profesor con la resolución de problemas hardware de bajo nivel que no suelen estar relacionados con el objeto de estudio.

Sin embargo, recientemente ciertas herramientas reconocidas en el ámbito académico, como *MATLAB* y *Simulink*, usadas en el diseño y simulación de sistemas de control de robots, se han visto potenciadas por la incorporación de capacidades para programar de forma transparente las plataformas de desarrollo hardware de bajo coste más populares, como son los sistemas *Arduino* [5], Lego NXT, Beaglebone y Raspberry Pi, entre otras [4].

La solución ideal tanto para el profesor como para el alumno es disponer de una herramienta de alto nivel para el diseño de sistemas de control de robots, y su modelado, para simulación y generación de código que pueda ser evaluado sobre un robot físico de bajo coste [17]. En concreto, el objetivo de este trabajo es presentar la experiencia de la creación de unos equipos de prácticas de robótica de bajo coste programables con la herramienta *MATLAB/Simulink* en asignaturas de robótica. Para lo cual se ha diseñado y construído la plataforma móvil PIERO (Véase Figura 1).

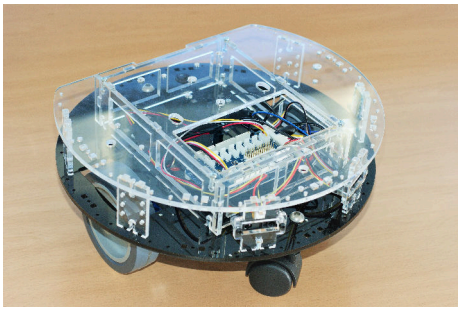


Figura 1: Plataforma robótica educativa PIERO basada en *Arduino* programable mediante *Simulink*

Entre las materias impartidas por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, existen diversas asignaturas relacionadas con la robótica, y el modelado y control de robots móviles y manipuladores. En éstas se incluyen prácticas de control, cinemática y dinámica, que a menudo se realizan mediante cálculos y simulación en *MATLAB* y *Simulink*.

El principal beneficio esperado es que el entorno de desarrollo elegido, al resultar familiar tanto a profesores como a alumnos, reduzca el tiempo necesario de preparación de prácticas y de aprendizaje debido a que no se requiere el aprendizaje de otros lenguajes ni herramientas de programación adicionales [8]. Asimismo se espera que la realización de las prácticas en laboratorio sea más eficiente debido a que el mismo modelo que se construye para simular el robot se utiliza para controlarlo. Por último un beneficio adicional esperado consiste en el reducido coste económico del hardware utilizado. Además, éste artículo pretende servir de ayuda o referencia a los profesores interesados en

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

el diseño de prácticas relacionadas.

En la sección 2 se puede encontrar una descripción de la plataforma móvil desarrollada para la realización de prácticas. A continuación se describe el diseño de un conjunto de prácticas y los principales aspectos a tener en cuenta en su diseño y realización. Posteriormente, en la sección 4 se evalúan los beneficios esperados. Por último se incluyen conclusiones sobre el uso de la herramientas propuestas para la docencia de robótica.

2. La Plataforma Móvil

El equipo de prácticas se ha diseñado en base a un robot móvil con los siguientes requerimientos:

- Coste reducido y de fácil fabricación mediante componentes comunes.
- Robusto y de tamaño medio.
- Simple y fácil de programar.
- Autónomo y que permita funcionamiento inalámbrico.
- Sistema de sensores configurable que incluya odometría.

2.1. Diseño mecánico

La plataforma posee una planta de forma circular con un diámetro de 30 cm y un sistema de locomoción diferencial con ruedas locas pasivas frontal y trasera. Las ruedas activas son de 100 mm y están accionadas por servomotores *EMG30* [16] comunes en tiendas de componentes de robótica. Puede realizar giros sobre su centro geométrico con radio de curvatura cero y sin deslizamientos.

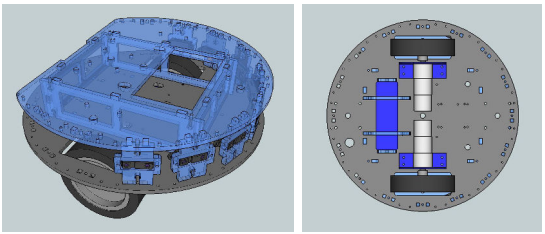


Figura 2: Diseño de la plataforma móvil PIERO realizado con *Sketchup* disponible *on-line*

En la parte inferior de la base se encuentra la electrónica de potencia y en la parte superior se ubican el microcontrolador y los sensores. Asimismo, posee un segundo nivel sobre el que se podría colocar un ordenador portátil.

Los diseños se han realizado mediante el software de diseño 3D *Sketchup* y se encuentran disponibles *on-line* en varias versiones [12]. Pueden exportarse fácilmente a formato DXF para su fabricación mediante corte por láser.

2.1.1. Módulos de sensores

PIERO posee un sistema modular de paneles laterales mediante el cual se pueden intercambiar los sensores. Actualmente se han construido módulos que soportan los clásicos sensores ópticos de distancia por infrarrojos de Sharp [19] y genéricos para añadir sensores de otros tipos.

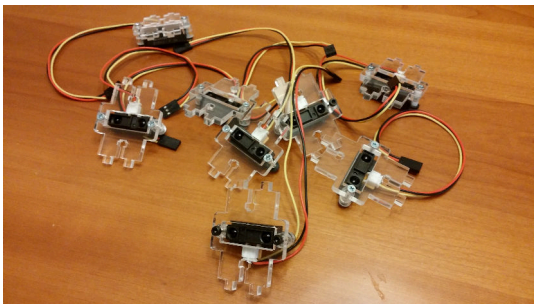


Figura 3: Paneles de sensores removibles

Los sensores utilizados [19] permiten medir distancias en base al ángulo de reflexión del haz de infrarrojos en un rango de 9 a 80 cm. Se alimentan a 5 V y proporcionan una salida analógica entre 0.4 y 2.7 V que se actualiza cada 38 ms, y que debe ser convertida para obtener las distancias.

2.2. Electrónica de potencia

Se han incorporado baterías *LiPo* de 3 celdas (11.1V) de 2400 mAh por la corriente que suministran y por su rapidez de carga. Proporcionan energía tanto a la electrónica de potencia como al microcontrolador, que reduce la tensión a 5V mediante un regulador propio. La conexión de tierra de las baterías es común a todo el sistema electrónico del robot. Están protegidas mediante un fusible y un interruptor en serie que desconectan completamente la corriente del robot.

El circuito de control de potencia para los motores es un L298 que incluye dos puentes H completos de 2 A. Si bien los motores pueden requerir más corriente (hasta 2.5 A). El disipador incluído en el módulo le permite funcionar sin calentamiento y se obtienen pares suficientes para esta aplicación. Módulos con este circuito (u otro compatible) pueden adquirirse a muy bajo coste.

Cada puente H del L298 se controla con tres líneas (Véase Figura 4): EN1(2) (Activación), conectada a una salida PWM; IN1(3) e IN2(4) que seleccionan la polaridad (dirección) y el tipo de parada (libre o con freno). Se requieren por tanto seis salidas digitales desde el *Arduino* hasta el módulo del L298. Se conectan mediante un único conector de 6 hilos etiquetado para facilitar al alumno la identificación de las señales y su programación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

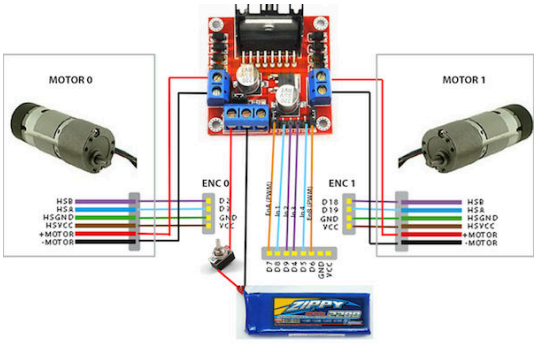


Figura 4: Esquema de la electrónica de potencia y conexionado de los *encoders*

2.3. Electrónica de control

El control de la plataforma está basado en un microcontrolador *Arduino Mega2560* compatible con los microcontroladores soportados por *Simulink*. Se ha elegido éste modelo respecto a otros, como el UNO, debido a que posee un mayor número de puertos de entrada/salida, interrupciones y periféricos.

El sistema de conectores que identifica a la familia *Arduino* es adecuado para conectar otras placas de circuito impreso (denominadas *shields*) pero no resulta adecuado para la conexión de múltiples dispositivos directamente ya que sólo posee de un pin de tierra y alimentación.

Las *shields* de conexionado comerciales proporcionan infinidad de conexiones de tres hilos (GND, VCC y señal), si bien los dispositivos interesantes suelen requerir dos líneas de señal: módulos de comunicaciones, sensores I^2C, codificadores incrementales, etc. Por ello se ha adoptado un sistema de conexiones basado en la *GROVE Shield* [18], que usa estas conexiones de 4 hilos para todas las entradas y salidas, desarrollándose una *shield* propia.

2.3.1. PIERO Shield

Se ha diseñado la *PieroShield*. Una placa de conexiones compatible con *Arduino Mega2560* que se ha diseñado usando el software de diseño de circuitos impresos *Eagle* [6]. A esta placa de conexiones se le han añadido los siguientes puertos de conexión (todos ellos con líneas de tierra y alimentación incorporadas):

- 16 puertos digitales dobles
- 8 puertos analógicos dobles
- 2 puertos para *encoders*
- 1 puerto de mando para el módulo del L298
- 3 puertos UARTS
- 4 puertos I2C

Posee conectores de paso 0.1". Conectores hembras para los puertos digitales y conectores machos para las conexiones con el microcontrolador y resto de puertos. Esta placa puede verse en la figura 5.

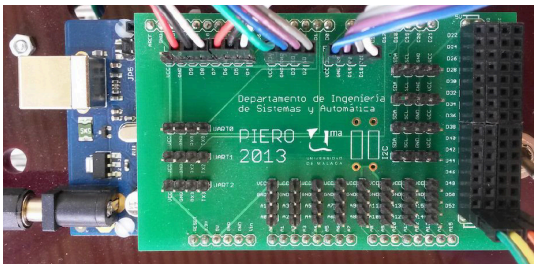


Figura 5: Placa de conexiones desarrollada para *Arduino Mega*

2.3.2. Codificadores angulares incrementales

Los codificadores angulares incrementales de los motores permiten controlar el movimiento de las ruedas del vehículo. Estos sensores permiten ejecutar trayectorias y estimar la posición mediante odometría. Esta característica es un requisito indispensable para la realización de prácticas de robótica móvil.

Los codificadores de los servomotores *EMG30* son de tipo magnético, con dos salidas digitales (A y B) de pulsos de 5 V que se conectan a entradas de interrupción del *Arduino*. Permiten obtener una resolución de 360 cuentas por vuelta si se decodifican en modo $4x$ (Considerando los flancos de subida y bajada de A y B). El microcontrolador posee seis lineas de interrupción externa [3]. Se han usado las líneas 2, 3, 18, 19 para las señales A y B de los *encoders* de las dos ruedas. La alimentación (5 V) se obtiene del regulador de la placa a través de conector de 4 pines mencionado en la sección 2.3.1.

2.4. Comunicaciones inalámbricas

El microcontrolador cuenta con cuatro puertos serie, de los cuales uno es utilizado por *Simulink* para la carga de programas y la ejecución en *modo externo*.

La ejecución en *modo externo* permite ejecutar el modelo de simulación simultáneamente en el hardware externo (el robot) y en el computador para hacer la simulación (ejecución) interactiva, mostrando valores y gráficas de evolución de las variables, y también para modificar valores de parámetros del modelo, lo que permite depuración y ajuste de controladores durante el funcionamiento del sistema. Esto se efectúa de manera transparente,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mediante un protocolo propio, sin necesidad de programar código para ello. Son necesarios más recursos por lo que no es compatible con los *Arduino UNO* o *nano*, debido a su reducida memoria de programa.

La alternativa a este modo consiste en programar las comunicaciones de manera explícita mediante los bloques que proporciona la biblioteca de funciones básicas de *Arduino*. Lo cual requiere de programación de código específico tanto en el microcontrolador como en el PC.

Para cumplir con el requerimiento de funcionamiento inalámbrico se ha elegido un módulo de comunicaciones *Bluetooth* [1] con capacidades especiales que permiten sustituir el cable de comunicaciones de manera transparente. Esto es posible debido a que: gestiona la señal de *reset* del microcontrolador para la carga de nuevos programas; y posee un sistema de auto-ajuste de velocidad de su *UART*. La función de reset requiere que el módulo maestro del PC sea versión 3.0 o superior.

Otras alternativas de comunicación inalámbrica consisten en adaptadores *Wifi* o *Zigbee* que presentan costes más elevados y o no son trasparentes.

2.5. Software

El soporte de *Arduino* en *MATLAB* incluye una biblioteca de bloques específicos que se encargan de gestionar las entradas/salidas. Internamente están programados en C y hacen la función de *drivers* del hardware externo. El resto de las funciones se implementan mediante los bloques estándar de *Simulink*. El conjunto de bloques proporciona acceso a: entradas/salidas digitales, entradas analógicas, salidas PWM, comunicaciones serie y entradas/salidas de pulsos para servos RC. No obstante, no proporcionan funciones que serían de gran utilidad como decodificación de codificadores incrementales, lectura de sensores ultrasónicos, comunicaciones I^2C o SPI.

Existen unos ejemplos de programación incluídos y se pueden encontrar más recursos en MakerZone [14], una comunidad de usuarios creada por *MathWorks* para proporcionar soporte a los principales *targets*.

3. Prácticas

Se han diseñado una serie de prácticas que van desde el control de posición o velocidad de las ruedas a la ejecución de una tarea basada en una máquina de estados finitos. Estas prácticas se han planteado como las diversas etapas del desarrollo de un único proyecto de laboratorio consistente en el objetivo último de la programación de un robot móvil completo.

3.1. Introducción a la programación de *Arduino* mediante *Simulink*

Inicialmente se realiza una práctica tutorizada para enseñar a los alumnos los aspectos relacionados con el uso y la configuración de la herramienta de desarrollo. Para ello se implementa el control de la orientación de un sensor de luz utilizando una fotocélula y un servo conectados al *Arduino*. Se implementa una estrategia básica de control proporcional y los alumnos lo ejecutan en modo remoto y externo para observar los valores de las variables del sistema y modificar los parámetros del controlador.

3.2. Control de la plataforma móvil

El objetivo de esta práctica es enseñar la electrónica de control del robot móvil y su manejo básico. En ella se estudia el esquema de conexiones y el alumno desarrolla sus propios bloques de control del vehículo. Asimismo, se instalan los módulos de comunicaciones inalámbricas y se prueba su funcionamiento. Al final de esta práctica, cada grupo ha desarrollado sus propios bloques que utilizarán en prácticas siguientes. Los bloques desarrollados son los de: envío de consignas a la electrónica de potencia de las ruedas y lectura de los sensores analógicos de distancia mencionados en la sección 2.1.1.

3.3. Control de posición

El objetivo de esta práctica consiste en aprender a controlar el movimiento de las ruedas del vehículo mediante el uso de los *encoders*. Para ello se les propone realizar un control de posición sobre uno de los motores utilizando un controlador PID. La decodificación de las señales de los codificadores incrementales no está incluída entre las funciones básicas por lo que se le proporciona al alumno el código C necesario para implementar su propio *driver* como una *S-Function* que hace uso de las interrupciones (Véase Sección 4.2). En la figura 6 se muestra un ejemplo de solución del modelo *Simulink*.

En este esquema se observa el lazo típico de control que incluye el bloque PID propio de *Simulink*. El signo de la salida del PID se utiliza para seleccionar el sentido de giro. Se ha incorporado un mecanismo para evitar la zona muerta del motor. El par deseado se envía como una señal PWM al puente H que controla el motor.

Las ganancias del PID se sintonizan mediante el método de Ziegler-Nichols [15] basado en la ganan-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

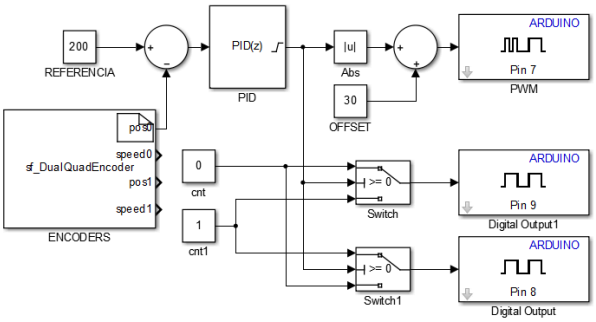


Figura 6: Esquema Control de Posición

cia crítica K_{cr} y en el periodo crítico P_{cr}. Estos valores se han obtenido gracias al uso combinado de los bloques *Scope* junto con la ejecución en *modo externo*.

Una vez sintonizado el PID se usa la posición de la rueda no controlada como referencia de posición de la controlada. En la figura 7 se observan la posición de la rueda no controlada (referencia) y la posición de la rueda controlada.

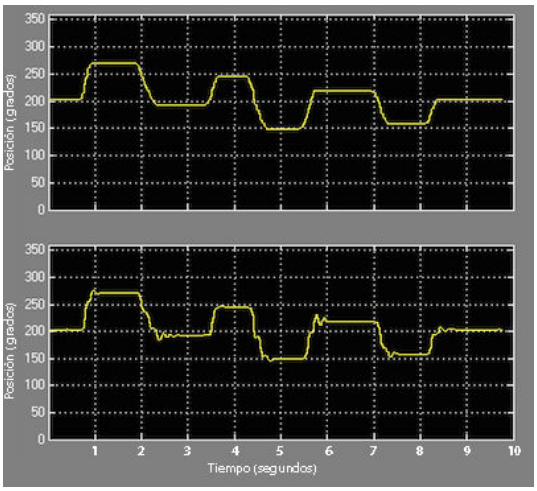


Figura 7: Resultado Control de Posición durante una ejecución de 10 s

3.4. Control de velocidad

Esta práctica consiste en controlar las velocidades de las ruedas del vehículo. Para ello se implementa un bucle de control velocidad de los motores. Ésta práctica enfrenta al alumno con el problema de la baja resolución de los *encoders*. Ya que el cálculo de la diferencia de posiciones entre ciclos aumenta el error de estimación a medida que aumentamos la frecuencia del control. Asimismo, la elevada desviación temporal sobre el periodo de muestreo *jitter* del *Arduino* introduce un gran ruído en la estimación de la velocidad.

Para obtener una mejor estimación de la velocidad del vehículo se puede usar diferentes técnicas que requieren de una modificación del bloque de lectura implementado en la práctica anterior.

3.4.1. Cálculo de la velocidad basado en interrupciones

Esta técnica consiste en obtener la posición de los motores de cada cierto periodo de tiempo, mediante una rutina de interrupción asociada a un temporizador, independientemente de la frecuencia del control y calcular la velocidad utilizando la fórmula 1.

$$w\,(rpm) = \frac{\Delta pos \times 60}{T_m \times E} \tag{1}$$

donde T_m representa el periodo de muestreo en segundos y E el número de cuentas por rotación que ofrece el *encoder* (360 en este caso).

El periodo utilizado en esta práctica es de 180 ms, para lo que se ha configurado el *timer5* del *Arduino* con este propósito. El código necesario se ha incluido en la misma *S-Function* que lleva a cabo la decodificación de los *encoders*.

Se ha montado el mismo esquema mostrado en la figura 6 y se ha sintonizado el PID utilizando la misma técnica utilizada para control de posición. El la figura 8 se muestra el resultado de esta práctica.

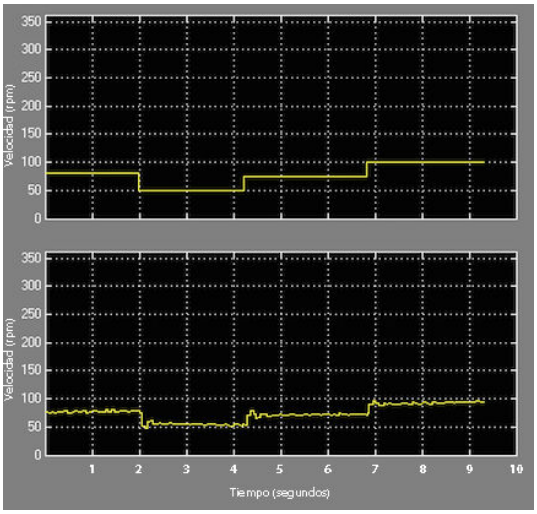


Figura 8: Resultado Control de Velocidad

3.4.2. Cálculo de velocidad basado en posición y tiempo

Una alternativa al cálculo de velocidad de los motores desarrollada en el apartado anterior, consiste en la inclusión de una marca de tiempo para el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dato de posición con ello se elimina el efecto de imprecisión de la medida debida a la desviación de exactitud de la señal del reloj, efecto conocido como *jitter*. Para el cálculo de la marca de tiempo se modifica el bloque funcional de lectura de *encoders* desarrollado en [9] de la siguiente forma:

- En la pestaña *Initialization* en *Sample mode* se cambia a *Inherited* con ello se consigue que el tiempo de muestreo del sistema de control sea el mismo que el de la lectura de la posición y poderlo cambiar sin la necesidad de recompilar el bloque funcional.
- En la pestaña *Output ports* se añade el parámetro *time* creándose así una segunda salida.
- En la pestaña *Output* se añade el código de la figura 9.

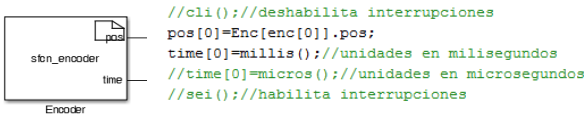


Figura 9: Nuevo Bloque *Encoder* y código modificado en la pestaña *Outputs*

Las diversas alternativas para calcular la marca de tiempo del dato posición utilizando el código nativo del *Arduino* y que se han estudiado en este apartado se encuentran como comentarios de código en la figura 9. Dichas alternativas dependen de la manera de extraer el valor del reloj del microcontrolador, usando la función *millis()* o la función *micros()*. Asimismo se ha probado a habilitar o deshabilitar las interrupciones durante esta lectura. Estas cuatro posibilidades se analizan en la sección 4.4.

3.5. Navegación reactiva

En esta práctica se implementa un sistema de control de navegación reactiva en el que la velocidad lineal y angular del vehículo es función de las lectura de los sensores delanteros de distancia. El alumno crea la función de evitación y el bloque con la cinemática inversa del vehículo para calcular las velocidades de las ruedas, que se envían a los bloques de control de velocidad.

3.6. Navegación basada en estados

El objetivo de esta última práctica es desarrollar un sistema de navegación basado en una máquina de estados finitos. En el ejemplo se muestra un sistema con dos estados. El alumno aprende a utilizar la herramienta *Stateflow* de *Simulink* y a integrarla en el bucle de control.

En uno de los estados la plataforma avanza, y en el otro, la plataforma gira debido a la presencia de un obstáculo. En la figura 10 se muestra esta máquina de estados, que cuenta con una entrada (*dist*) la distancia al obstáculo, que determina las condiciones de transición entre estados y dos salidas (*vel_izq* y *vel_der*) para determinar la velocidad de giro de cada rueda.

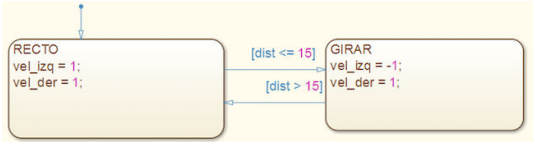


Figura 10: Diagrama de estados de la tarea de navegación programada en *Stateflow*

En el ejemplo mostrado se ha implementado la detección de los obstáculos mediante un sensor de distancias ultrasónico. Para ello se ha implementado una *S-Function* basándose en la biblioteca *NewPing* [7] de *Arduino*. En la figura 11 se muestra un ejemplo del diagrama completo.

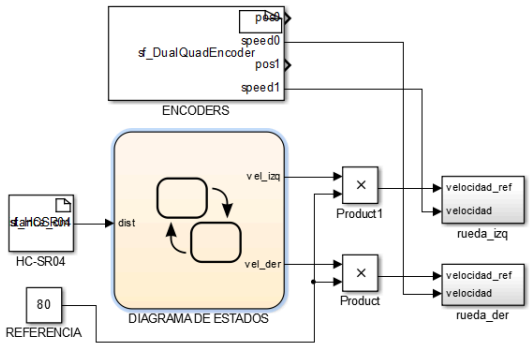


Figura 11: Diagrama *Simulink* del sistema de navegación basado en estados

4. Resultados

Durante el primer año del desarrollo de esta herramienta docente se ha trabajado en el diseño y construcción de la plataforma robótica. Pero también, en la creación del conjunto de prácticas y su evaluación mediante sesiones con alumnos y experimentales. A continuación, se incluyen algunos de los inconvenientes encontrados que condicionan el diseño e implementación del resto de las prácticas.

4.1. Pruebas

Se han realizado experimentos docentes en asignaturas de robótica con las prácticas 1 y 2 (descritas en las secciones 3.1 y 3.2). Los alumnos han aprendido a configurar el software y también han conectado sensores y actuadores al sistema *Arduino*.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Éstas prácticas también han servido para verificar el funcionamiento homogéneo de las plataformas construídas y de los sistemas de control de los motores. En estas prácticas los alumnos han tenido el primer contacto con el software de desarrollo y con el hardware, lo que les ha motivado visiblemente.

4.2. Lectura de codificadores incrementales

Para controlar el movimiento de los motores es necesario decodificar las señales de los codificadores incrementales. En el ejemplo oficial del módulo de soporte de *Arduino* se asume una única señal de pulsos que detecta la velocidad de avance de las ruedas en una dirección. Para estimar la velocidad se usa un bloque controlado por eventos como se muestra en la Figura 12 cuya entrada proviene de un bloque de entrada digital a la que se conecta el sensor óptico. No se implementa como una interrupción sino que se establece un periodo de muestreo (en el ejemplo es de 1 ms). Cada evento (subida o de bajada en la señal de disparo) provoca la ejecución del bloque que mide el tiempo transcurrido entre eventos a partir de la hora del sistema. Éste método presenta problemas de actualización con velocidades bajas y sobrecarga el microcontrolador con velocidades altas.

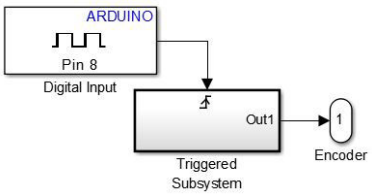


Figura 12: Bloque ejecutado por eventos para medir la velocidad de una rueda

Además, tampoco puede usarse en robots con tracción diferencial, donde las velocidades pueden cambiar de signo en los giros, y la capacidad computacional del microcontrolador limita el número de pulsos por vuelta del sensor. Por otra parte, este ejemplo menciona un control PID, que no existe, siendo a lo sumo proporcional.

No existe un medio oficial para la lectura de codificadores incrementales. Para resolver este problema se han diseñado y probado los métodos descritos en la sección 3.4 con resultados satisfactorios.

4.3. Pull-ups internos

Una entrada digital, como las que se usan para detectar los pulsos de los codificadores incrementales de las ruedas (Véase sección 2.3.2) u otros sensores con salida por transistor en colector abierto, puede poseer resistencias internas (denominadas *pull-up*) para conseguir una lectura de un uno lógico cuando la entrada está en alta impedancia y un cero lógico cuando la entrada se conecta a tierra. Este sistema permite simplificar el hardware y el conexionado de múltiples sensores. En el lenguaje de *Arduino*, la activación de los *pull-up* internos se realiza escribiendo un uno en un puerto digital configurado como entrada, tal como se muestra en el código de la Figura 13. No obstante, las librerías de soporte de *Arduino* en *Simulink* sólo permiten especificar el número del pin de entrada a leer y no permiten usar dicho número en otro bloque de salida digital.

```
/* Configura el puerto pin como entrada */
pinMode(pin, INPUT) ;
/* Habilita resistencias pull-up interna */
digitalWrite(pin, HIGH );
```

Figura 13: Código para la activación de los *pull-up* internos

Sin embargo, las señales de los *encoders* que provienen de sensores de efecto hall requieren de *pull-up*. La soluciones pueden ser varias: incorporar las resistencia *pull-up* físicamente, programar una *S-Function* con un *driver* para activarlas o utilizar el *driver* ya programado [9] para la lectura de los *encoders*, que incluye dicho código y utiliza las interrupciones eficientemente. En nuestro caso utilizaremos esta última solución.

4.4. Rendimiento y *Jitter* en *Arduino*

Un buen determinismo temporal (bajo *jitter*) es necesario en un sistema de tiempo real para limitar el error cometido en cálculos que dependen del tiempo, como son la diferenciación (cálculo de la velocidad) y la integración (cálculo de la parte integral de un PID). Con el fin de medir el determinismo temporal del *Arduino* programado con *Simulink* se han realizado unos experimentos para registrar la desviación temporal con diferentes intervalos de ejecución. Éstos experimentos se han ejecutado en *modo externo* manteniendo el motor a la máxima potencia durante 100 segundos, las gráficas de dispersión de las mediciones se han obtenido con *MATLAB*, haciendo uso de la función *boxplot()*. Se ha marcado el valor de la media con un rombo y un asterisco.

El primer experimento sirve para estimar el *jitter*, calculándolo con ayuda de la marca de tiempo para un tiempo de muestreo del sistema de 100 ms y con el *Arduino* ejecutando un código simple (Véase figura 14). La menor dispersión del valor viene dada por el uso de la instrucción *millis()* con las interrupciones habilitadas pero sin grandes variaciones con respecto a las demás.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

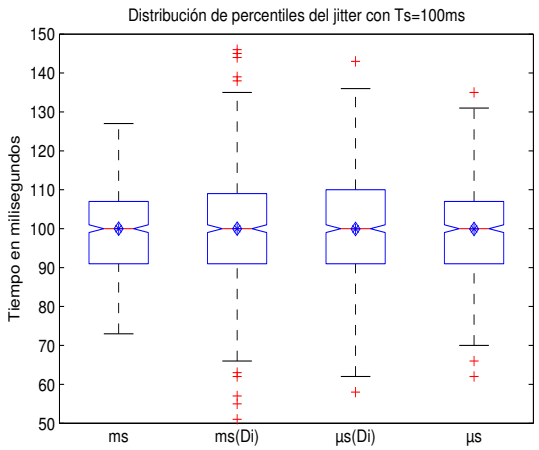


Figura 14: Desviación del valor del reloj para un tiempo de muestreo de 100 ms durante 100 seg. (*ms* indica el uso de la instrucción *millis()*, μs indica el uso de la instrucción *micros()*, *(Di)* indica la deshabilitación de interrupciones en el *Arduino*).

La influencia del *jitter* en la estimación de la velocidad se ilustra la figura 15. Se presentan los valores de velocidad angular calculadas con y sin tener en cuenta la marca de tiempo. En la observación de la figura 15 cabe destacar cómo se pasa de unos errores de velocidad que oscilan entre del 15 al 50 % a un errores en la medida que van desde 0.5 al 3 %.

Los mejores resultados se han obtenido usando la función *micros()* con las interrupciones deshabilitadas. Los mismos resultados se obtuvieron de los experimentos realizados con un tiempo de muestreo de 50 ms, si bien todavía se acusaron más debido al aumento de la dispersión del *jitter* conforme se disminuye el tiempo de muestreo.

La utilización de un tiempo de muestreo de 10 ms con el mismo experimento obtuvo unos resultados sorprendentes en cuanto al valor del *jitter* obtenido. En luegar de centrar el valor entorno a esos 10 ms, el valor se centra próximo a los 20 ms. La gráfica de dispersión que se ilustra en la figura 16 demuestra que el *Arduino* es incapaz de alcanzar valores inferiores a 15 ms de tiempo de ejecución y eso para un programa muy simple, es decir, el rendimiento que se consigue con el código escrito en *Simulink* y en *modo externo* lo hacen altamente ineficiente y la supervisión del *jitter* muy necesaria.

4.5. Versiones de *MATLAB*

Si bien, puede utilizarse cualquier versión de *MATLAB* con soporte *Arduino*, las últimas versiones, han automatizado el proceso de incorporación del soporte de ésta y otras plataformas físicas me-

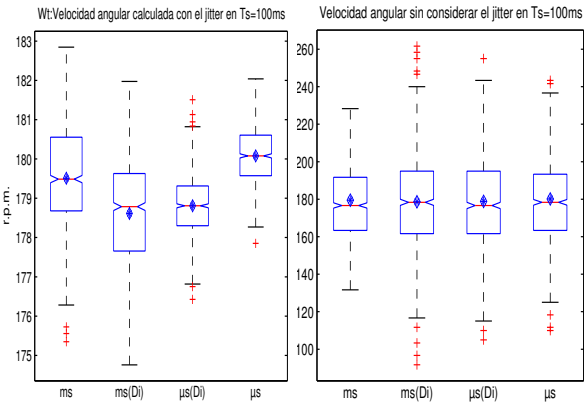


Figura 15: Dispersión en los valores de velocidad angular máxima del motor con o sin compensación de *jitter* para un tiempo de muestreo de 100 ms durante 10 seg (*ms* indica el uso de la instrucción *millis()*, μs indica el uso de la instrucción *micros()*, *(Di)* indica la deshabilitación de interrupciones en el *Arduino*).

diante un repositorio centralizado que facilita su instalación y actualización.

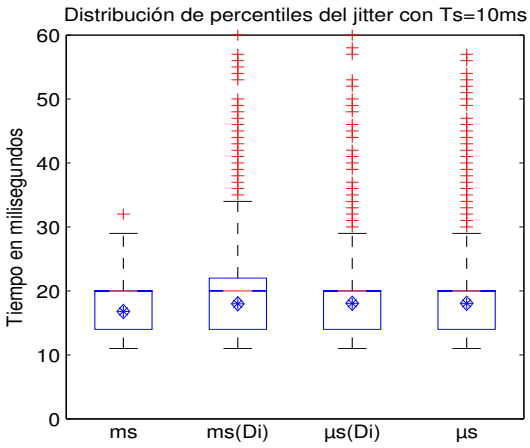


Figura 16: Desviación del valor del reloj para un tiempo de muestreo de 10 ms durante 100 seg. (*ms* indica el uso de la instrucción *millis()*, μs indica el uso de la instrucción *micros()*, *(Di)* indica la deshabilitación de interrupciones en el *Arduino*).

Esta puesta al día, necesaria para usar las últimas características, puede resultar difícil en los actuales laboratorios docentes ya que *Mathworks* ha anunciado que a partir de la versión 2014b (2015 y posteriores) no será compatible con sistemas operativos de 32 bits.

No obstante la versión 2014a ha resultado muy inestable durante la realización de estas prácticas, por lo que, hasta nuevas versiones, se recomienda usar 2013b.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5. Conclusiones

De acuerdo a estos requerimientos planteados en la sección 2 se ha diseñado la plataforma y se han construído un total de seis unidades con un coste inferior a 200 €por robot.

Entre los objetivos iniciales de este trabajo se encuentran determinar si el uso de *Simulink* y *Arduino* permite la realización de prácticas basadas en proyectos para asignaturas de robótica de manera eficiente. En concreto se han encontrado los siguientes beneficios:

- Tiempo de adopción reducido. En términos de incremento del tiempo de preparación de prácticas por parte del profesor y de los alumnos (número de horas invertidas por el profesor para aprender la herramienta y horas de clase dedicadas a su uso).
- Adecuación. Diversidad del tipo de prácticas posibles dentro del campo de la robótica (identificación, control, cinemática, planificación, etc).
- Bajo coste de los equipos de prácticas.
- Alto nivel de motivación. Tanto de los alumnos como del profesor.
- Generalidad. Múltiples posibilidades de aplicación de esta plataforma a otras asignaturas con lo que se reduce el coste económico y de tiempo.
- Utilidad futura. Proveen al alumno de una herramienta de diseño y desarrollo de sistemas relacionadas con la mecatrónica y la robótica que incluso puede ser replicada en su casa por su bajo coste.
- Otros beneficios. El aprendizaje basado en proyectos desarrolla las competencia de trabajo autónomo.

Asimismo se ha estudiado el determinismo temporal del sistema de desarrollo para comprobar las sus capacidades a la hora de implementar un sistema de control y se han mostrado los resultados en una tarea de estimación de la velocidad de las ruedas del robot.

Entre los beneficios que se esperan obtener durante el próximo curso, aparte de la evaluación del tiempo invertido en la realización del conjunto de prácticas completo, se encuentran la posibilidad de probar en sistemas físicos los resultados de herramientas de alto nivel como *Stateflow*, las utilidades de diseño de control borroso u otros.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto de Innovación Educativa de la Universidad de Málaga, con código PIE13-134, e Ingeniería UNO (http://www.ingenieriauno.com/).

Referencias

[1] Adafruit, *Bluefruit EZ-Link*, https://learn.adafruit.com/introducing-bluefruit-ez-link/overview, Consultado Jun. 2014.

[2] Apte, A. (2014), "Line Following Zumo Robot Using Simulink", *Adafruit on-line tutorials*, https://learn.adafruit.com/line-following-zumo-robot-programmed-with-simulink.

[3] Arduino, *Arduino Mega 2560*, http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560, Consultado Jun. 2014.

[4] Basso, M. , Innocenti, G. and Rosa, A., (2012) "Simulink meets Lego: Rapid Controller Prototyping of a Stabilized Bicycle Model", *52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy.*

[5] , Beni, N., Grottoli, M., Ferrise, F., Bordegoni, M. (2014),"Rapid Prototyping of Low Cost 1 DOF Haptic Interfaces, *IEEE Haptics Symposium, pp. 479 - 483.*

[6] Cadsoft, *CadSoft EAGLE PCB Design Software*, http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software, Consultado Jun. 2014.

[7] Eckel, T. (2012), "NewPing Library for Arduino", *Arduino Playground*, http://playground.arduino.cc/Code/NewPing

[8] Gartseev, I.B., Lee, L.F., and Krovi, V.N. (2011) "A Low-Cost Real-Time Mobile Robot Platform to support Project-Based Learning in Robotics and Mechatronics", *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education. Vienna, Austria*, pp. 117-124.

[9] Giampiero, C. (2013), "Writing a Simulink Device Driver block: a step by step guide", *MATLAB File Exchange.*

[10] Gómez-de-Gabriel, J.M., Fernández-Lozano, J.J. and García-Cerezo, A.J. (2012), "Evaluación de la contribución del aprendizaje basado en proyectos a la adquisición de competencias en estudiantes de Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial" *Actas de las XXXIII Jornadas de Automática, Vigo.*

[11] Gómez-de-Gabriel, J.M., Mandow, A., Fernández-Lozano, J. and García-Cerezo, A.J. (2011), "Using LEGO NXT Mobile Robots With LabVIEW for Undergraduate Courses on Mechatronics" *IEEE Transactions on Education, Vol. 54, I.1, pp. 41-47.*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[12] Gómez-de-Gabriel, J.M. (2014) *Piero Mobile Robot Platform* http://gomezdegabriel.com/wordpress/projects/piero-mobile-robot-platform/

[13] Lamár, K. and Kocsis, A. G. (2013), "Implementation of speed measurement for electrical drives equipped with quadrature encoder in LabVIEW FPGA", *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering.*

[14] Mathwoks, *MakerZone Arduino, Raspberry PI and Lego Mindstrorms Resources*, http://makerzone.mathworks.com/, Consultado Jun. 2014.

[15] Ogata, K. (1999), "Ingenieria de Control Moderna (Spanish Edition)", *Prentice Hall, pp. 670 - 679.*

[16] Robot Electronics, *EMG30 mounting bracket and wheel specification*, http://www.robot-electronics.co.uk/htm/emg30.htm, Consultado Jun. 2014.

[17] Rogers J.R. and McVay, R.C. (2012), "Graphical Microcontroller Programming", *IEEE International Conference onTechnologies for Practical Robot Applications (TePRA), pp. 48 - 52.*

[18] Seeed Studio, *Grove Mega Shield* http://www.seeedstudio.com/wiki/Grove_-_Mega_Shield, Consultado Jun.2014.

[19] Sharp, *GP2D12 Optoelectronic Device*, http://www.sharpsma.com/webfm_send/1203, Consultado Jun. 2014.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONFIGURATION MODEL FOR CONTROL KERNEL MIDDLEWARE BASED APPLICATIONS

Jose L. Beltrán, Lorena Calabuig, Eduardo Munera, José Simó, Jose-Luis Poza-Lujan
Institute of Control Systems and Industrial Computing
Polytechnic City of Innovation
Polytechnic University of Valencia, Spain
{jobelal2; locamo}@inf.upv.es, {emunera; jsimo; jopolu}@ai2.upv.es

Abstract

In this paper the configuration model for Control Kernel Middleware is presented. The configuration capabilities of the system have been defined in order to provide a clean interface for managing system elements. The development of a user interface that implements the model provides a more reliable and efficient way to perform configuration tasks. A communication system based on DCPS is used as base to achieve reliable communications through the distributed system. The communication structures for message exchange will be introduced. Finally some experiments for the validation of the tool will be presented.

Keywords: control kernel, configuration tool, communication system, distributed control system, embedded system.

1 INTRODUCTION

Distributed control systems are more and more used in complex architectures. It is common to find this systems in flight controllers, robots, autonomous vehicles, etc. where sensors, actuators and control devices are scattered. Typically, these systems do not usually provide friendly configuration interfaces so for the user it is difficult to make any modifications. Furthermore, it is usual that configuration files have considerable sizes so user is forced to know the structure in order to manage it. In this regard, human errors are common. A software tool which integrates configuration capabilities of the system provides transparency to the user, reduce errors and optimize system use.

The configuration model obtained for Control Kernel Middleware (CKM) [1][5][14] is presented in this work. The development of an user interface that implements the mentioned model allows to generate configuration files automatically. The submission of the setting are provided by a communication system based on DCPS which spread the information required using topics.

This paper is organized as follows: in section 2 a revision of the existing configuration tools in embedded systems is done. Section 3 presents the configuration model obtained for the Control Kernel Middleware. Section 4 will deal with the resulting configuration files. In section 5 is presented the graphic interface implemented from model. The communication system designed for broadcast information by topics is presented in section 6. Section 7 shows the obtained results in order to validate the tool. And finally in sections 8 and 9 the conclusions obtained and the future lines of work is shown.

2 RELATED WORK

The Control Kernel was presented as a solution to process control where the objective is to achieve transparency in the design and applications development of real-time control. Subsequently, their implementation as middleware [4][9] has provided a set of services and interfaces used for basic management of the components of a control system: *sensors*, *actuators* and *controllers*. This middleware has two implementations, the full version called *Full Middleware* (FCKM) [9] and the reduced version called *Tiny Middleware* (TCKM) [9] used in systems with limited resources.

The CKM has a multitude of configuration options in a similar way as in others middleware. To ease the design process to the user, these middleware have graphical interfaces to configure it. An example is *Choregraphe* [12], a program developed by Adelbaran Robotics for NAO robots. Choregraphe allows users to define robot behaviors without any knowledge of programming. A predefined behaviour can be easily configured through the use of a block diagram edition environment.

More extended and specific configuration tools can be found as [11] or *rxDeveloper* [8] which offers modification of nodes interactively. Furthermore, tools like POLCOMS [18] interface allows the visualization and real-time parameterization of the system data. This interface implements CORBA [10] for communication between client and server.

Some communication middleware that implement the publication/subscription model offer graphical interfaces [7] for variable modification. Taking as an example the above tools, a user interface

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

has been designed to help the programmer in the CKM configuration task.

3 CONFIGURATION MODEL

Control Kernel Middleware has a set of services [9] responsible for managing the basic components of a control system: sensors, actuators and controllers. Each component has different configuration capabilities. It has been defined a configuration model based in xsd files [19] [2] which specify all the needed parameters for starting the middleware offered services and load the desired application. This model contains precise information about the definition of the required parameters to perform a service request and its configuration. In Fig. 1 can be observed a global representacion of the model.

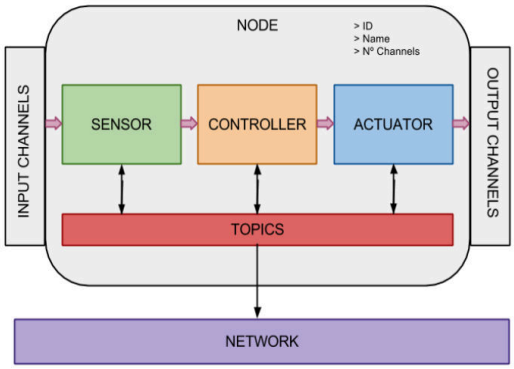


Figure 1: Configuration model of CKM

The system can be comprised of one or more nodes. In the distributed system, each node can have a combination of the components shown in the previous figure. All middleware components have been modeled. Below there is a brief description of each of them: nodes, sensors, actuators, controller, channels and communication mechanisms.

- The node is a logical component which has no associated specific functionality. Represents a physical element that contains the other components such as sensors, actuators, controllers, channels and topics.
- Sensors and actuators are logical components that connect the input and output channels of a node respectively. Both components define a predefined set of functions for the signal processing. The control engineer can use the defined functions or specify your own.
- The controller is a purely logical component. It is characterized by not having any associated hardware channel.
- The topcis are used for the dissemination of information between components. A topic is classified as internal or external. An internal topic is used within the scope of a node. Communications between different nodes are provided by external topics. This classification is only done conceptually. Internally, the middleware does not differentiate between the two types.
- Channels are considered as logical representations of a physical input/output element.

Hierarchical model allow to extract partial configuration from distinct modules and/or components. The model definition based on xsd files provides mechanisms to validate the configuration files. In Fig. 2 is presented the representation of a node by using XSD code.

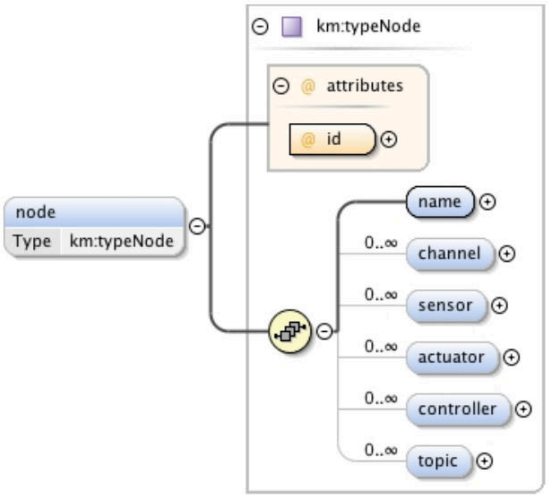


Figure 2: Representation of a node by using XSD code.

Once the model is specified in XSD code any application or user can validate the configuration files from the defined model.

4 CONFIGURATION FILES

In Control Kernel Middleware, the configuration is obtained through the use of xml files, who are generated from the model. In the same way as the model, xml files can describe the configuration both totally or partially. Every xml contains valid configurations in any case that is able to be validated itself against the model through standard xml/xsd validation mechanisms [6].

Once the configuration is disseminated through the communications system, the middleware is able to load this xml configuration files. Aflter loading and validating these files are performed

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

the needed middleware calls for setting described configurations.

Although configuration files can be edited in manual mode using a text editor, and following the described criteria in the mode, in most occasions, this edition mode is very unfriendly and can easily lead to errors. For that reason it has been developed an user interface which allows the user to generate and modify configurations in a practical way, without the need of a deep known about the model.

5 DEVELOPMENT INTERFACE

In order to ease as much as possible the application design process, a user interface has been implemented. The interface allows the user to design the control application avoiding required real time (RT) programming, communications, etc. In Fig. 3 can be observed a capture of the configuration and edition application.

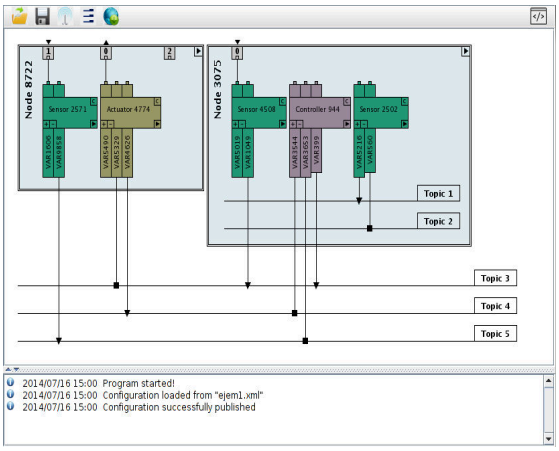


Figure 3: Configuration editor interface

Once the design is fulfilled, application generates xml files that will be used by the CKM to load the application. The settings are sent by using the communication system described in section 6. The application validates xml files generated from the defined model. In this sense, it has managed to design applications without the need to have knowledge about the structure of the model. The generated files can be edited from the same application or manually through a simple editor.

In addition, interface also allows to connect with the middleware at run time for handling the configuration dynamically, so in those cases that the user perform configuration changes during the execution, these changes can be stored within the rest of configuration files for future executions.

6 COMMUNICATION SYSTEM

Distributed system functioning is based on the possibility of the communication between different components. Communication system covers aspects of diverse complexity, whether it is connection and message addressing or message format to spread the content of that messages.

The user interface is responsible for sending the configurations to the rest of the distributed system. For this it is necessary to have a communication system that ensures reliable delivery of messages. It has been implemented a communication system based on Data Distribution Service (DDS) [3] model for this purpose.

DDS model defined in [16] is a specification for distributed systems that simplifies complex network programming and implements a publish/subscribe model for sending and receiving data, events and commands among the nodes. The DDS specification is divided into two layers:

- Data-Centric Publish-Subscribe (DCPS): The lower level that is targeted towards the efficient delivery of the proper information to the proper recipients.
- Data-Local Reconstruction Layer (DLRL): An optional higher level which is responsible for adapt the local applications data.

As in this article is pretended to illustrate the dissemination of necessary information for the configuration tool, it is only described DCPS communication model of DDS.

6.1 DCPS COMMUNICATION MODEL

DCPS model, explained in [3][13], is a communication model that provide the functionality required by an application based in publish/subscribe paradigm for data distribution using *topics*.

In this context, publisher are responsible for writing in a topic and subscriber reads that topic. As much publisher as subscriber are in charge of the communication between control system and communication system and are separated. This separation allows to organize and manage communications efficiently; this is the concept of a middleware.

6.2 BROADCAST CONFIGURATION

The communication system implemented handles connexions to spread messages to the network

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

peers, so that a bidirectional connection between the different pairs of nodes is established.

All peers know the another peers connected so we are talking about a fully connected mesh topology. In this context, each peer publish its identity by a diffusion channel. In order to establish a pairing pattern of connections, each peer can only connect to another peer which GUID is greater.

The best way to communicate and synchronize peers in distributed systems is by message passing [15]. To enable the system to distinguish the type of message received, the following types are implemented:

- *Plain*, containing any kind of information.
- *TopicData*, containing the topic to manage data inside the DCPS service.
- *TopicLink*, containing a list of a topics to subscribe or unsubscribe.
- *SyncTime*, that is used to synchronize clocks of a different peers.
- *ProxyWrapper*, wrapping a message in another message in order to send to more than one port.

The user interface within the system is considered as a peer more. The configurations are broadcast through messages of type *TopicData*.

6.3 MESSAGE FORMAT

The communication system uses different types of message as mentioned in 6.2. Every message have a header and a payload, but also have a prologue (Fig. 4), that the system uses it to distinguish the different messages received. Prologue contains the type of a message (*Type*).

Other fields are also included in the prologue: *flag*, used to discard messages that are not successfully received; *size*, indicates the size of the message header and payload; and *source IP* and *port*, indicates the peer IP and port that sends the message. Figure 4 shows all the fields previously explained.

TopicData message have a specific header and payload as it is shown in Figure 4. In the message header, *time stamp* is measured in microseconds, *topic name size* is the size of the *topic name*. The *payload buffer* contains the data to be transmitted, in this case, the data to set the tool is in xml format.

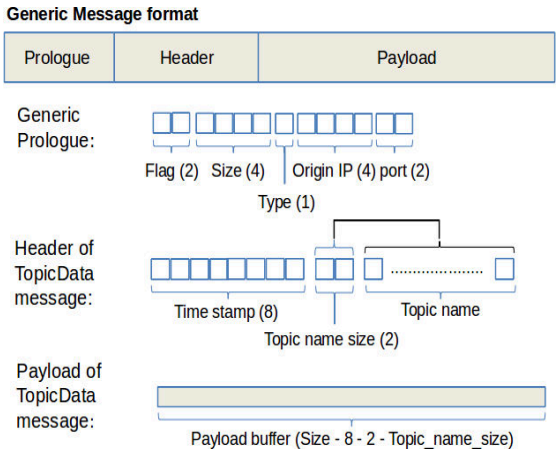


Figure 4: Message format for TopicData

7 EXPERIMENTAL RESULTS

Several experiments have been developed in order to validate the correct operation of the user interface. The goal is to verify that the configuration files are correct and the model was properly defined. For this purpose, a KertrolBot [17] robot is used. This robot is equipped with two infrared sensors and has Wi-Fi communications.

The scenario could be defined as shown in Fig. 5. It is a distributed system consisting of two nodes implementing a version of CKM. Node 1 is a personal computer with the FCKM version. In this node, the user interface is executed. Communication between nodes is done via the TCP protocol. Node 2 implements versions TCKM where the configurations are received and applied.

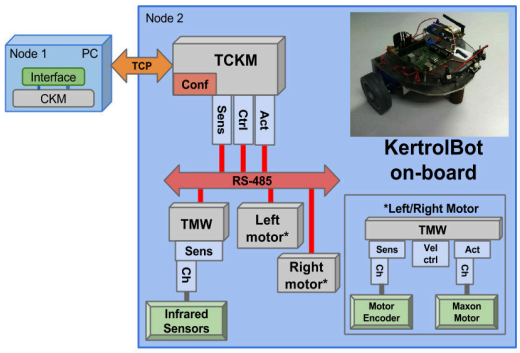


Figure 5: Experimental platform system overview

In each experiment, the robot moves through a room with obstacles which have been placed randomly. The idea is to observe how the robot acts on the environment based on the configurations applied in each moment. Developed experiments are described below:

- Experiment 1: The robot starts moving with

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

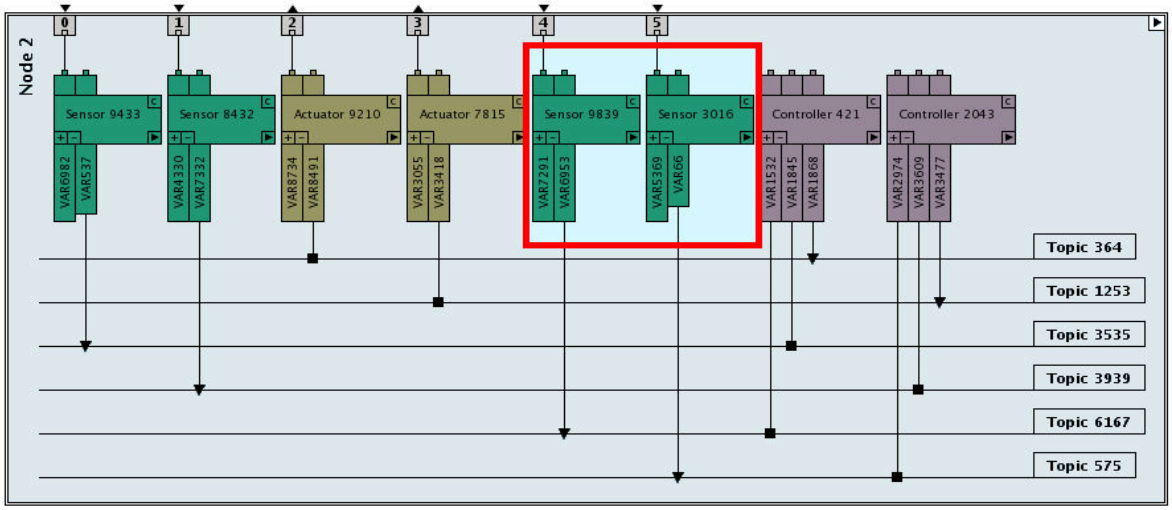


Figure 6: Configuration management tool showing the design of the experiments

disabled sensors. This behavior causes the robot collides with obstacles. Once in motion, the left sensor is enabled. The goal is to verify that the robot manages to avoid obstacles detected on the left side.

- Experiment 2: It is a continuation of the experiment 1. The robot starts moving with the configured behavior in the previous experiment. The objetive is to verify that the robot is able to avoid obstacles on both sides.
- Experiment 3: Like the previous case, the robot starts its motion from the last set configuration. In this case the goal is to disable both sensors and check that the robot is not able to detect obstacles in its environment.

In all experiments it has been proved as the configurations influence the control system. On the other hand, it also verifies that the configurations are applied at runtime. In Fig. 6 can be observed the designed application for the experiments.

8 CONCLUSIONS

The configuration model of the Control Kernel Middleware has been defined. All the basic components of a control system have been included. From this model it is possible to generate full configuration files with all the capabilities of the middleware configuration currently supported. A hierarchical structure allows to extract partial configuration from distinct modules and/or components.

Using XSD schema as descriptive method provides a mechanism for users and software tools to validate the configuration files. The design of a new user interface facilities the system design and helps to specify and manage configurations through the use of xml files, as a result, workflow is speed up considerably. Using this interface a dual objective is met. First, it has managed to avoid the control engineer necessarily have extensive knowledge of the defined model. Second, it has been possible to obtain a tool able to generate configuration files which meet the specification of the model.

On the other hand, the use of a communication system based in DCPS has facilitated the dissemination of information among the different nodes of the distributed system. The implementation of the system based on the publish/subscribe model has proven to be an efficient form of communication. The structures of these communications have been presented.

Finally, experiments on a physical environment have allowed verifying proper operation of the user interface as well as the validation of the defined model. Moreover, these experiments have allowed to verify that the new settings are applied dynamically.

9 FUTURE WORK

From the conclusions obtained after the development of the user interface, the ability to develop new work where the system is able to monitor the status of each node is proposed. The objective would be to parameterize the information transmitted in the DCPS topics. This solution allows to check the correct system performance, assess its condition and to detect anomalous situations. Likewise, a correct detection may involve the management of secure routines to avoid undesirable

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

situations in the controlled system. This is especially important in critical systems. Similarly, a monitoring system allows an alarm management using QoS. If a critical variable does not meet quality of service, the tool could start executing safe routines.

In addition, the monitoring system can be used as debugging tool because it would be possible to observe the communication between components. In this sense, the control engineer can check in real time if your design is meeting the expected functionality.

Moreover, it also proposes to include namespaces within the communications system for the purpose of making a more efficient management. The aim is to make modifications to a group of components rather than modify them individually as at present. The guidelines to create groups of components would be based on its performance, features, etc. On the other hand, the control engineer would be able to monitor the status of these groups of components.

Acknowledgment

This work has been supported by the Spanish Science and Innovation Ministry MICINN under the CICYT project COBAMI: DPI2011-28507-C02- 01/02 and the "Real time distributed control systems" of the Support Program for Research and Development (PAID-06-12) Research Vice-Chancellor of the Polytechnic University of Valencia (SP20120834). The responsibility for the content remains with the authors.

References

[1] Albertos, P., Crespo, A. & Simó, J., (2006) A key concept in embedded control systems. 4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems.

[2] Biron, P., Malhotra, A., & World Wide Web Consortium. (2004). XML schema part 2: Datatypes. World Wide Web Consortium Recommendation REC-xmlschema-2-20041028.

[3] CORBA, O., & Specification, I. I. O. P. (1999). Object Management Group.

[4] Coronel, J.O., Blanes, F., Simó, J. & Nicolau, V., (2008) Middleware de kernel de control para el desarrollo de aplicaciones en sistemas empotrados de tiempo real. XXIX Jornadas de Automática.

[5] Crespo. A., Albertos, P., Balbestre, P., Vallés, M., Lluesma, M. & Simó, J., (2006) Schedulability issues in complex embedded control systems. IEEE International Conference on Control Applications.

[6] Fialli, J., & Vajjhala, S. (2003). The Java architecture for XML binding (JAXB). JSR, JCP, January.

[7] Karsai, G., Neema, S., & Sharp, D. Model-driven architecture for embedded software: A synopsis and an example. Science of Computer Programming, 73(1), 26-38. 2008.

[8] Millers, F., Holz, D. & Behnke, S. rxDeveloper: Gui-aided software development in ROS.

[9] Muñoz, M., Munera, E., Blanes, F., Simó, J. & Benet, G., (2013) Event driven middleware for distributed system control. XXXIV Jornadas de Automática.

[10] Object Management Group (OMG), (1995) The Common Object Request Broker (CORBA): Architecture and Specification. Technical report, Object Management Group.

[11] Palopoli, L., Lipari, G., Abeni, L., Di Natale, M., Ancilotti, P., & Conticelli, F., (2001) A tool for simulation and fast prototyping of embedded control systems. In ACM SIGPLAN Notices (Vol. 36, No. 8, pp. 73-81). ACM.

[12] Pot, E., Monceaux, J., Gelin, R., & Maisonnier, B., (2009). Choregraphe: a graphical tool for humanoid robot programming. In Robot and Human Interactive Communication, 2009. RO-MAN 2009. The 18th IEEE International Symposium on (pp. 46-51). IEEE.

[13] Luján, J. L. P., Ten, J. E. S., & Yague, J. L. P. El modelo de comunicaciones DCPS. ISO 690. 2009

[14] Simarro, R., Coronel, J.O., Simó, J. & Blanes, J.F., (2008) Hierarchical and distributed embedded control kernel. In 17th IFAC World Congress.

[15] "Sistemas Distribuidos. Conceptos y Diseño", 3a edición. Pearson Educación, 2001, ISBN: 8478290494

[16] Twin Oaks Computing, Inc (2011) Communications Middleware and DDS.

[17] Vicente Nicolau and Manuel Muñoz and Jose Simó. KertrolBot Platform. SiDiReLi: Distributed System with Limited Resources. Institute of Control Systems and Industrial

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Computing - Polytechnic University of Valencia. Technical report, 2011.

[18] Wain, R. & Ashworth, M, (2005). A Java GUI and Distributed CORBA Client-Server Interface for a Coastal Ocean Model. Council for the Central Laboratory of the Research Councils.

[19] Thompson, H. S., Beech, D., Maloney, M., & Mendelsohn, N. (2004). XML schema part 1: structures second edition. 2004-10. http://www. w3. org/TR/2004/REC-xmlschema-1-20041028.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

NAVEGACIÓN REACTIVA EN ENTORNOS ESTRECHOS E INTRINCADOS

Javier Antich Tobaruela
Cra. de Valldemossa km. 7,5 – Campus Universitat de les Illes Balears – 07122 – Palma de Mallorca,
Javier.Antich@uib.es

Alberto Ortiz Rodríguez
Cra. de Valldemossa km. 7,5 – Campus Universitat de les Illes Balears – 07122 – Palma de Mallorca,
Alberto.Ortiz@uib.es

Resumen

El que un robot pueda moverse autónomamente y sin conocimiento previo del entorno desde un punto A o inicial a un punto B o/u final/objetivo constituye una necesidad básica dentro de la robótica móvil. Durante las tres últimas décadas, investigadores de todo el mundo han intentado dotar a sus robots de esa capacidad. Para ello, estos investigadores han propuesto/desarrollado diversos paradigmas de control que, principalmente, se clasifican en: paradigma reactivo, paradigma jerárquico, y paradigma híbrido. Cada paradigma se caracteriza por un conjunto de principios básicos que describen —en términos generales— la forma en la que debe llevarse a cabo el control de un robot. El primero de estos paradigmas, el reactivo, se inspira en la imitación del comportamiento de supervivencia de algunos animales. Más concretamente, el paradigma reactivo sugiere que cada acción se decida sólo teniendo en cuenta el entorno local del robot; además, dicho paradigma exige que todas las decisiones sean tomadas siguiendo razonamientos simples/no intensivos. El presente trabajo se sitúa, precisamente, en este contexto, es decir, bajo el enfoque del paradigma reactivo.
Basándose en los principios del paradigma reactivo, son muchas y variadas las estrategias de control que se han propuesto a lo largo de los últimos años. Algunas de estas estrategias facilitan la navegación del robot por espacios estrechos; otras, posibilitan que el robot pueda evitar grandes obstáculos, incluso cuando éstos tienen una forma compleja e intrincada; etc. En este trabajo se presenta una nueva estrategia de control reactivo denominada ***Most Promising Gap —****o, abreviadamente,* ***MPG****. Esta nueva estrategia resulta de la combinación adecuada de otras dos estrategias ya existentes. MPG hereda las capacidades de navegación de las dos estrategias que combina, permitiendo así que un robot pueda moverse con éxito tanto en entornos con pasos estrechos como en entornos altamente intrincados. Con el objetivo de validar la herencia de estas capacidades, se incluyen los resultados de varios experimentos simulados y reales.*

Palabras Clave: Robótica móvil, paradigma de control reactivo, navegación en entornos estrechos e intrincados

1 INTRODUCCIÓN

La *robótica móvil autónoma* es el área de la *robótica* que crea robots capaces de desplazarse de un lugar a otro sin intervención humana. Para que eso sea posible, el robot debe percibir, razonar y actuar sobre el entorno que le rodea. El robot *percibe* su entorno con un conjunto de sensores, *razona* aplicando técnicas pertenecientes al ámbito de la Inteligencia Artificial (IA), y *actúa* sobre su entorno mediante un conjunto de actuadores, todo ello con el objetivo final de acometer la tarea que le han encomendado.

Desde finales de los 60 hasta los años 90, muchos investigadores intentaron definir los principios básicos que un robot debía seguir a la hora de percibir, razonar y actuar. De esta larga etapa surgieron tres corrientes principales que tomaron el nombre de *paradigma jerárquico* —también conocido como *paradigma deliberativo—, paradigma reactivo* y *paradigma híbrido*. Cada una/uno de estas/estos corrientes/paradigmas representa una forma distinta de entender cómo debe llevarse a cabo el control autónomo de un robot. A grandes rasgos, el paradigma jerárquico propugna la construcción de un modelo simbólico del entorno y la utilización de este modelo como base para la toma de cualquier decisión (cabe notar aquí que, en las implementaciones más avanzadas de este paradigma, el modelo simbólico se construye a medida que el robot navega por el entorno; cada vez que el robot cambia de posición y/u orientación, los sensores del robot proporcionan nuevo conocimiento del entorno; ese nuevo conocimiento se va acumulando y así se va haciendo progresivamente el modelo más completo). Por otro lado, el paradigma reactivo plantea una idea diametralmente opuesta al del paradigma anterior. Ahora, la acumulación de conocimiento se interpreta como algo negativo que impide que el robot pueda

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

adaptarse adecuadamente a su entorno, principalmente cuando éste es cambiante. Partiendo de esta idea, el paradigma reactivo propone que todas las decisiones sean tomadas en base a, únicamente, la percepción "local" que el robot tenga del entorno justo en el momento de la toma de la decisión. Es más, según este paradigma, cualquier decisión debe ser fruto de un razonamiento simple/básico, tal y como ocurre en la mayor parte de los comportamientos instintivos de los animales y de las personas. Finalmente, el último paradigma, el híbrido, puede ser visto como un punto intermedio entre el enfoque puramente cognitivo del paradigma jerárquico y el enfoque puramente biológico del paradigma reactivo. Al igual que el paradigma jerárquico, el paradigma híbrido permite la construcción de modelos globales del entorno, así como la aplicación de procesos de razonamiento intensivos sobre estos modelos. Además de esta capacidad de razonamiento global, el paradigma híbrido permite también dotar al robot de comportamientos reactivos que garanticen su supervivencia ante hechos inesperados. Desde los años 90 hasta hoy, los mayores avances en la creación de robots autónomos inteligentes se han conseguido bajo el influjo del paradigma híbrido. Este influjo, sin embargo, tiene su verdadero origen en los paradigmas jerárquico y reactivo, dado que el paradigma híbrido se alimenta fundamentalmente de los avances provenientes de esos dos otros paradigmas.

Como indica el título del artículo, el presente trabajo aborda el problema de la navegación reactiva de un robot. Por ello, en lo que resta de introducción, ya sólo hablaremos del paradigma reactivo, dejando a un lado los paradigmas jerárquico e híbrido.

En la literatura relacionada con el paradigma reactivo podemos encontrar dos formas ligeramente diferentes de entender este paradigma. Esas dos formas se conocen bajo los nombres de paradigma reactivo *puro* y paradigma reactivo *no puro*. Debido a su naturaleza reactiva, ambos paradigmas tienen un carácter local; es decir, toman decisiones exclusivamente en función del entorno más próximo que rodea al robot. Pero, ¿qué significa "más próximo"? Ahí es, precisamente, donde el paradigma reactivo puro y no puro se diferencian, al dar cada uno de ellos un significado sensiblemente distinto a dicho término. A este respecto, el paradigma reactivo puro considera como entorno más próximo al robot a aquél que está siendo actualmente percibido por los sensores del robot (se ignora, por tanto, cualquier percepción del entorno pasada, y se trabaja sobre el mundo tal y como es ahora). Por otro lado, la versión no pura del paradigma reactivo hace una interpretación más amplia del término, al considerar que el entorno más próximo al robot viene dado no sólo por la percepción actual, sino también por todas aquellas percepciones que se hicieron en un pasado reciente (en estos sistemas, el robot retiene ese pasado reciente utilizando una memoria a corto plazo).

En el año 1986, el profesor Rodney Brooks [1] propuso con gran éxito la primera arquitectura de control basada en el paradigma reactivo (esa arquitectura fue —y es, a día de hoy— conocida bajo el nombre inglés de "subsumption"). Desde el año 1987 en adelante, muchos otros investigadores siguieron el camino iniciado por Brooks, en busca de nuevas y más avanzadas arquitecturas/estrategias de control reactivo. Como fruto de esa investigación, actualmente existe un número muy elevado de diferentes arquitecturas/estrategias reactivas. Algunas de estas arquitecturas/estrategias son puras [2]; otras, en cambio, son no puras [3]. Algunas de ellas están específicamente pensadas para ser aplicadas sobre robots de tipo holonómico [4]; otras, en cambio, son capaces de tener en cuenta las restricciones de movimiento que tienen algunos robots [5]. Algunas arquitecturas/estrategias reactivas permiten que el robot pueda navegar por espacios estrechos [6]; otras, en cambio, posibilitan que el robot pueda seguir caminos razonablemente eficientes en espacios amplios [7] —esos espacios se caracterizan por la práctica total ausencia de obstáculos. Algunas arquitecturas/estrategias reactivas favorecen los movimientos del robot a alta velocidad bajo la premisa de la no colisión [8]. Por último, algunas otras proveen al robot la habilidad de sortear grandes obstáculos y de encontrar caminos de salida en entornos intrincados, tal y como pueda ser un laberinto [9].

En este trabajo se presenta la fusión de dos arquitecturas/estrategias de control reactivo existentes: *Closest Gap* [6] —o, abreviadamente, *CG*— y T^2 [9]. La primera de estas arquitecturas/estrategias es pura y permite a un robot moverse por pasajes extremadamente estrechos sin riesgo de colisión. La otra arquitectura/estrategia, en cambio, sigue un enfoque no puro y dota al robot de la inteligencia suficiente como para permitirle evitar cualquier obstáculo, con independencia del tamaño y la forma —simple o intrincada— que tengan estos obstáculos. Como quedará demostrado a lo largo de este artículo, la fusión propuesta da lugar a una nueva arquitectura/estrategia reactiva que goza de todas las ventajas que CG y T^2 ofrecen por separado. En concreto, esta nueva arquitectura/estrategia, bautizada con el nombre de **Most Promising Gap** —o, simplemente, **MPG**—, hace posible la navegación autónoma de un robot en entornos estrechos e/o intrincados.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tras esta introducción, el resto del artículo se ha organizado del siguiente modo: en la sección 2 se describen los principios de funcionamiento bajo los cuales operan las arquitecturas/estrategias reactivas CG y T^2; la sección 3 muestra cómo se puede obtener una mejor arquitectura/estrategia de control reactivo a partir de la fusión de CG y T^2 (es decir, la sección 3 nos presenta a *MPG*); la sección 4 evalúa, mediante la realización de complicados experimentos simulados y reales, las ventajas que *MPG* ofrece frente a CG y T^2; finalmente, en la sección 4 se exponen las conclusiones del trabajo y se sugieren algunas líneas de investigación futura.

2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE CG y T^2

2.1 SOBRE CG

Como ya se ha comentado en parte en la sección 1, CG es una estrategia de control reactivo de carácter puro que fue propuesta en [6] como una mejora de las estrategias *Nearness Diagram* [10] —popularmente conocida como *ND*— y *Smooth Nearness Diagram* [11] —también conocida por las siglas *SND*. Tanto CG como ND y SND son estrategias que tienen como principal objetivo el permitir que un robot pueda moverse por espacios estrechos, es decir, por lugares donde la distancia entre obstáculos es escasamente superior al tamaño físico del robot. CG aventaja a ND y a SND en los tres siguientes aspectos: (1) por un lado, CG es una estrategia más eficiente desde un punto de vista computacional, al ser capaz de tomar decisiones adecuadas siguiendo razonamientos menos complejos que los aplicados por ND y SND; (2) por otro lado, CG consigue que los movimientos del robot sean más suaves; (3) adicionalmente, CG disminuye la probabilidad de que el robot quede atrapado en una posición que no sea la destino.

Podemos imaginar el funcionamiento de CG como el de un proceso dividido en tres fases secuenciales: en la primera fase —F1—, CG busca caminos libres de obstáculos (aunque obvio, notar que esa búsqueda es de tipo local; esto significa que se basa, única y exclusivamente, en la información del entorno que proporcionan los sensores del robot en el instante en el que se inicia la búsqueda); en la segunda fase —F2—, CG escoge uno de entre todos aquellos caminos encontrados en la fase anterior; finalmente, en la tercera fase —F3—, CG genera los comandos de control necesarios para el robot siga el camino que ha sido seleccionado en la fase F2. La ejecución de las fases F1, F2 y F3 se repite hasta que el robot completa su tarea, es decir, hasta que el robot alcanza la posición destino deseada. Seguidamente, estas tres fases se describen con mayor detalle.

En la fase F1, CG analiza el entorno más próximo al robot en busca de huecos entre obstáculos lo suficiente amplios como para que el robot pueda navegar por ellos (en [6], los autores emplean el término inglés de *gap* para referirse a dichos huecos). Siendo más precisos, la fase F1 comprende los siguientes tres pasos: (F1.1) en primer lugar, CG percibe el entorno que rodea al robot utilizando los sensores que el robot tiene a bordo; (F1.2) posteriormente, CG hace uso de la información obtenida en el paso anterior para encontrar huecos entre obstáculos (en este punto, cualquier hueco es considerado sea cual sea su tamaño); (F1.3) finalmente, el último paso actúa como un filtro sobre el conjunto de huecos encontrados en el paso F1.2; más concretamente, CG elimina aquí todos aquellos huecos que tengan un ancho menor al tamaño físico del robot. La figura 1 ilustra con un ejemplo cada uno de los tres pasos de la fase F1.

En cuanto a la fase F2, ésta recibe como entrada los huecos resultantes/no eliminados del paso F1.3. En esta segunda fase, de todos esos huecos, CG selecciona aquél que, con mayor probabilidad, permitirá al robot alcanzar —o, al menos, estar más cerca de alcanzar— la posición destino deseada. Profundicemos un poco más en esta idea. Sin embargo, para ello, necesitamos antes introducir una serie de conceptos. Por un lado, $r_{destino}$ representa la recta que une el centro del robot con la posición destino. Por otro lado, $P^i_{extremo\,1}$ y $P^i_{extremo\,2}$ son los puntos extremos del hueco #i; es más, dado un $j \in \{1,2\}$, $r^i_{extremo\,j}$ denota la recta que une el centro del robot con el punto $P^i_{extremo\,j}$. Por último, $dist(r_1, r_2)$ es una función que devuelve el ángulo formado por las rectas r_1 y r_2, y $mindist^i$ es otra función que se define como:

$$min(dist(r_{destino}, r^i_{extremo\,1}), dist(r_{destino}, r^i_{extremo\,2})). \quad (1)$$

De acuerdo con la expresión (1), fijado un hueco #i, la función $mindist^i$ permite conocer la distancia angular mínima que existe entre la recta $r_{destino}$ y cada una de las dos rectas $r^i_{extremo\,1}$ y $r^i_{extremo\,2}$. Podemos concluir la explicación de la fase F2 diciendo que CG selecciona el hueco con la $mindist^i$ más pequeña. Continuando el ejemplo de la figura 1, la figura 2 muestra gráficamente cómo CG lleva a cabo este proceso de selección.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

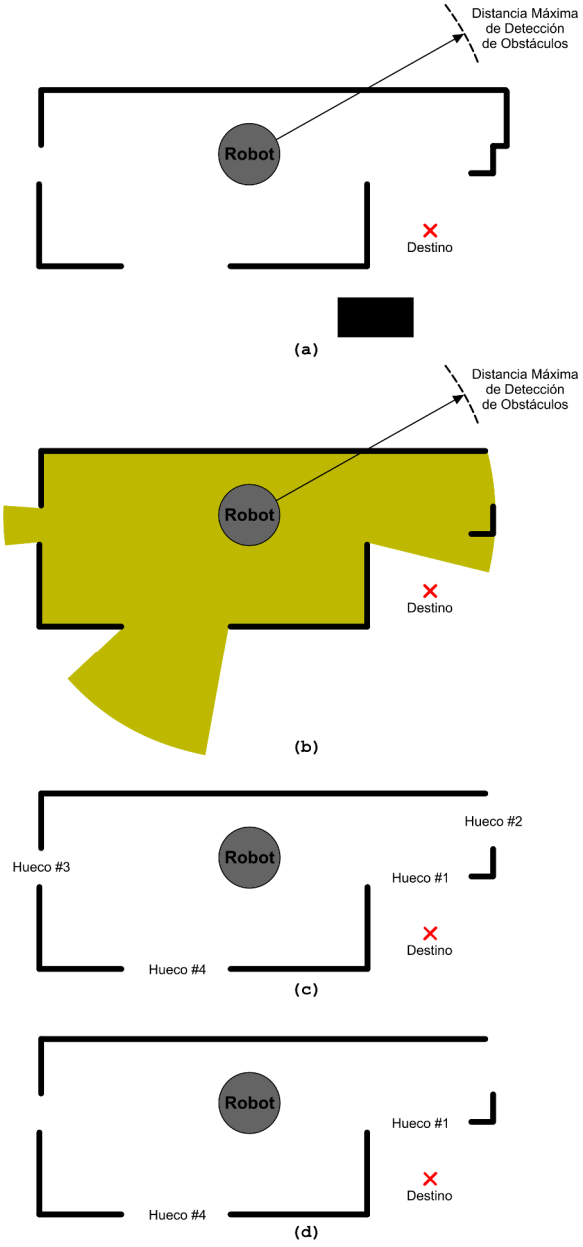


Figura 1: Fase F1 de CG: (a) entorno en el que se encuentra el robot (los obstáculos quedan definidos por las líneas gruesas negras y el rectángulo negro; se supone que el robot está equipado con un sensor de tipo láser con cobertura de 360 grados y una distancia máxima de detección concreta); (b) el entorno tal y como es percibido localmente por el robot; (c) detección de huecos entre obstáculos; (d) los huecos 2 y 3 son eliminados por ser más pequeños que el robot.

Pasamos ya a la última fase, la F3. Aquí, CG ordena al robot que se dirija hacía el hueco que ha sido seleccionado en la fase F2. La orden que CG envía al robot determina tanto la dirección como la velocidad de movimiento de este último. Los detalles acerca de cómo CG calcula esta orden no son relevantes de cara al resto del artículo, y,

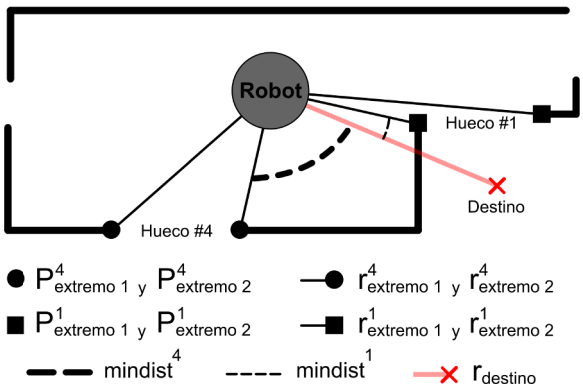


Figura 2: Fase F2 de CG: de entre los huecos #1 y #4, CG selecciona el #1 ya que $mindist^1 < mindist^4$.

por ello, serán omitidos. A este respecto, sin embargo, podemos decir, como idea general, que CG hace que el robot se mueva en dirección al centro del hueco a una velocidad que es proporcional a la distancia a la que se encuentra el obstáculo más próximo (para más información, el lector se puede remitir a [6]).

2.2 SOBRE T^2

En el año 2005 [9], los mismos autores de este artículo propusieron una nueva estrategia de control reactivo no pura denominada T^2. Ese nombre es la abreviatura de los dos principios básicos que rigen el funcionamiento de la estrategia. Concretamente, esos principios son: el principio de *Traversabilidad* y el principio de *Tenacidad*. Un robot que actúe bajo los principios de Traversabilidad y Tenacidad adquiere la capacidad de no quedar atrapado ante grandes obstáculos, incluso cuando éstos tienen formas intrincadas (un obstáculo grande tiene el inconveniente que sólo puede ser percibido parcialmente por el robot; un obstáculo intrincado implica la existencia de un área en el entorno de la que es muy difícil escapar una vez el robot está dentro de ella; un obstáculo grande e intrincado tiene ambos de los inconvenientes arriba indicados).

En los años posteriores a la aparición de la primera versión de la estrategia T^2 ([9], 2005), sus autores continuaron trabajando para mejorarla. La última de estas mejoras data del año 2012 [12]. En esta sección, la estrategia T^2 es descrita tal y como aparece en [12].

Como ya hemos comentado, la estrategia T^2 se concibe bajo los principios de Traversabilidad y Tenacidad. El significado de cada uno de estos dos principios se explica a continuación. Es más, también se analiza el comportamiento característico que tiene un robot cuyo control se basa en estos dos principios.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.2.1 El principio de *Traversabilidad*

De manera resumida, el principio de Traversabilidad sugiere lo siguiente (los puntos 1, 2 y 3 se ilustran en la figura 3(a), mientras que el punto 4 se ilustra en la figura 3(b)):

1. Dividir el espacio de direcciones alrededor del robot en K regiones, R_0 .. R_{K-1}, de igual tamaño.
2. Cada región debe ser etiquetada como *libre* o como *prohibida*. Dado un $i \in \{0, .., K-1\}$, la región R_i se dice que está libre cuando el robot no detecta, localmente, ningún obstáculo en todo el rango de direcciones que comprende la región. En caso contrario, la región R_i se dice que está prohibida.
3. Sea $R_{destino}$ la región sobre la que cae la recta $r_{destino}$ (al igual que ocurría en la sección 2.1, aquí $r_{destino}$ representa la recta que une el centro del robot con la posición destino). Sea C_{libre} el conjunto de todas las regiones libres. Entonces, $R_{libre}^{izq.}$ y $R_{libre}^{der.}$ se definen como sigue:

   3.1. Si $R_{destino} \in C_{libre}$,

   $$R_{libre}^{izq.} = R_{libre}^{der.} = R_{destino}$$

   3.2. Si $R_{destino} \notin C_{libre}$: por un lado, $R_{libre}^{izq.}$ es la región libre más próxima a $R_{destino}$ en sentido horario; por otro lado, $R_{libre}^{der.}$ es la región libre más próxima a $R_{destino}$ en sentido anti-horario.
4. Se debe dotar al robot de una memoria a corto plazo que le permita recordar obstáculos que fueron detectados en un pasado reciente. La figura 3(b) pone de manifiesto esta idea. Dicha figura asume que el robot se ha movido desde una cierta posición i a una cierta posición j (notar que la posición i es aquella posición en la que se encontraba el robot en la figura 3(a)). Como se puede observar, desde la posición j, el robot no detecta el obstáculo rectangular de más a la izquierda; sin embargo, el robot recuerda la existencia de este obstáculo[1] al haberlo detectado desde la posición i.

[1] las regiones R_{10} y R_{11} están prohibidas

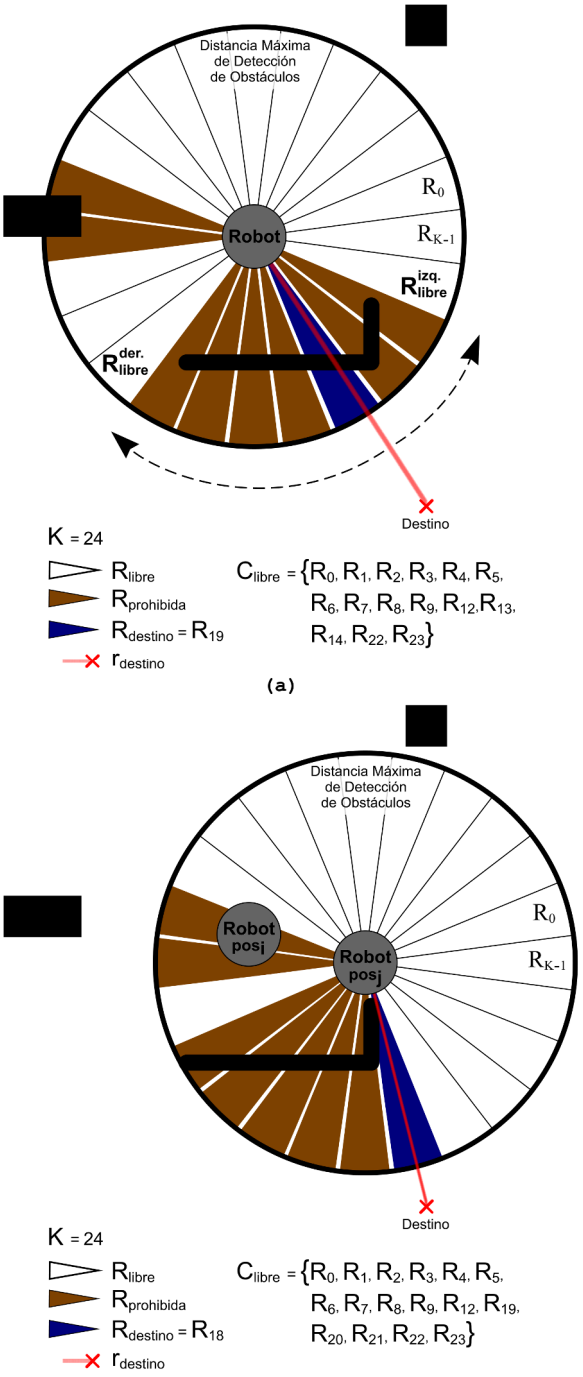


Figura 3: Ejemplificación del principio de Traversabilidad para un valor de $K = 24$.

La aplicación del principio de Traversabilidad da como resultado dos regiones: $R_{libre}^{izq.}$ y $R_{libre}^{der.}$.

2.2.2 El principio de *Tenacidad*

El segundo principio, el de Tenacidad, tiene por objetivo la selección de una de las dos regiones calculadas por el principio de Traversabilidad —es decir, selecciona $R_{libre}^{izq.}$ o $R_{libre}^{der.}$.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El principio de Tenacidad se puede configurar de dos modos diferentes, denominados *tenacidad a izquierdas* y *tenacidad a derechas*. Ambas configuraciones implican la elección de siempre la misma región. Más concretamente, en el caso de tenacidad a izquierdas, la región elegida es siempre $R_{libre}^{izq.}$; en cambio, en el caso de tenacidad a derechas, la región elegida es siempre $R_{libre}^{der.}$.

De aquí en adelante, denotaremos como R_T a la región elegida por el principio de Tenacidad, y como r_T a la recta con origen en el centro del robot que divide la región R_T en dos partes iguales.

2.2.3 El comportamiento de un robot basado en los principios de Traversabilidad y Tenacidad

Si suponemos que: (S1) los principios de Traversabilidad y Tenacidad se integran dentro del bucle de control del robot (eso significa que dichos principios se aplicarán una y otra vez hasta que el robot alcance la posición destino deseada); (S2) el robot se mueve en dirección de la recta r_T. Entonces, bajo estas dos suposiciones, el comportamiento del robot responde al siguiente patrón general:

C1. El robot avanza en línea recta hacía su destino, mientras no encuentre ningún obstáculo en el camino.

Este comportamiento se corresponde con los pasos 1 y 2 de la figura 4.

C2. Cuando el robot topa con un obstáculo, lo intenta evitar siguiendo su contorno.

El seguimiento del contorno del obstáculo se hará hacia la izquierda o hacia la derecha dependiendo del modo en el que haya sido configurado el principio de Tenacidad.

Este comportamiento se corresponde con los pasos 3, 4, 5 y 6 de la figura 4. En esta figura, se asume que la tenacidad es "a izquierdas".

C3. El seguimiento del contorno del obstáculo se prolonga hasta el momento en el que el robot encuentra un camino libre de obstáculos hacia su destino; es decir, el seguimiento termina cuando $R_{destino} \in C_{libre}$.

Este comportamiento se corresponde con el paso 7 de la figura 4.

Por último, notar que, tras el comportamiento C3, se pasa de nuevo al comportamiento C1, tal y como muestra el paso 8 de la figura 4.

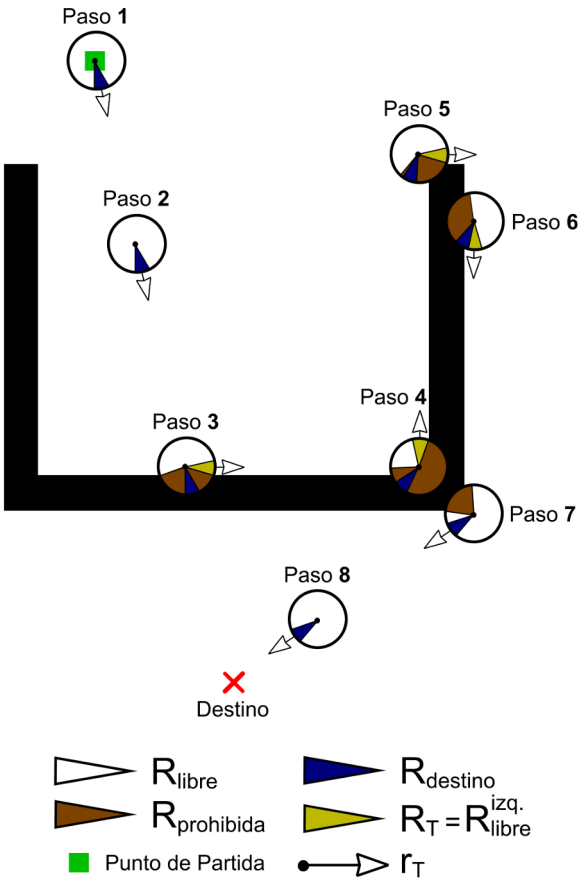


Figura 4: Comportamiento inducido por los principios de Traversabilidad y Tenacidad.

3 LA ESTRATEGIA REACTIVA MPG: MOST PROMISING GAP

Tal y como señalan sus autores en [6] y [12], las estrategias reactivas CG y T^2 dotan al robot de diferentes capacidades. En concreto, la primera de estas estrategias facilita la navegación del robot por espacios que son, a penas, unos centímetros más grandes que el tamaño del robot. Por otro lado, la segunda de estas estrategias es hábil encontrando caminos de salida cuando el robot queda atrapado ante obstáculos que tienen forma intrincada.

Ambas capacidades, tanto la ofrecida por CG como la ofrecida por T^2, son necesarias para conseguir robots móviles autónomos cada vez más inteligentes. En este sentido, es evidente, que la unión de estas capacidades sería de gran relevancia. Con esta intención, esta sección propone una nueva estrategia de control reactivo que es capaz de mover a un robot por espacios particularmente estrechos e intrincados, siempre con el objetivo final de alcanzar una posición destino dada. Esta nueva estrategia se denomina *Most Promising Gap* —o, simplemente, *MPG*—, y se obtiene a partir de la fusión de CG y T^2.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

A continuación, se da una visión general de la estrategia MPG, y se discuten algunos detalles sobre su funcionamiento.

3.1 VISIÓN GENERAL

La figura 5(a) muestra el esquema de bloques de la estrategia MPG. Como se puede observar, aparecen únicamente dos bloques: uno de ellos —el de más arriba— representa la estrategia T^2 tal y como fue descrita en la sección 2.2; el otro bloque representa una variante de la estrategia CG (como veremos más adelante, la diferencia entre la estrategia CG vista en la sección 2.1 y aquella integrada dentro de MPG radica en la forma de definir la función $mindist^i$).

Para poder operar, la estrategia T^2 necesita conocer cuál es el destino del robot así como la ubicación de los obstáculos que han sido recientemente detectados (esta última información la tiene disponible en su memoria a corto plazo que se alimenta continuamente de la percepción sensorial). En base a estas dos entradas, la estrategia T^2 genera su salida r_T . En este punto, se debe recordar que r_T es una recta que indica, en todo momento, el camino que el robot debería seguir; siguiendo ese camino el robot no quedará atrapado ante ningún obstáculo y acabará alcanzando su destino final (para más detalles sobre la recta r_T , el lector es remitido a la sección 2.2.2).

En su versión original [6], la estrategia CG requiere de dos entradas: por un lado, el destino del robot (se asume que ese destino queda definido por la recta $r_{destino}$ —ver sección 2.1); por otro lado, la ubicación de los obstáculos que estén siendo actualmente detectados/percibidos por el robot. En base a estas dos entradas, la estrategia CG elige el "hueco" por el que el robot debería pasar, y genera un comando de control para tal fin.

La estrategia CG que forma parte de MPG difiere de la original en dos únicos aspectos: sus entradas y la definición de la función $mindist^i$. En cuanto a sus entradas, esta variante de CG sigue teniendo dos, pero una de ellas ha cambiado. Concretamente, la entrada $r_{destino}$ de la estrategia original ha sido sustituida por r_T . La figura 5(a) evidencia este hecho al utilizar la salida de la estrategia T^2 como entrada de la estrategia CG. Por otra parte, la función $mindist^i$ ha sido redefinida para poder tener en cuenta ese cambio en las entradas. La expresión de dicha función queda ahora como sigue:

$$min\left(dist\left(r_T, r^i_{extremo\ 1}\right), dist\left(r_T, r^i_{extremo\ 2}\right)\right). \quad (2)$$

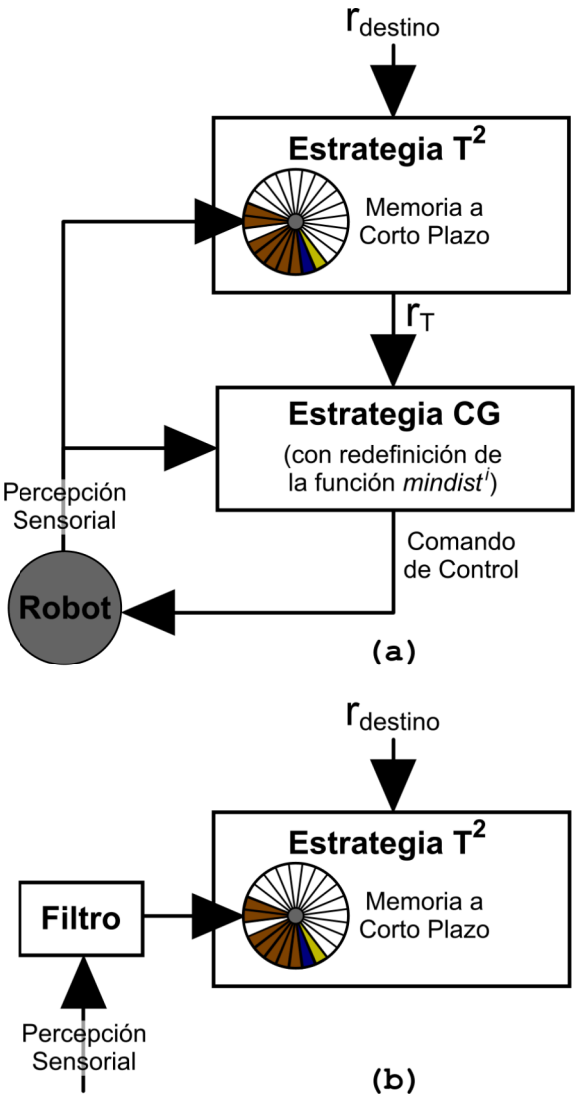


Figura 5: Esquema de bloques de la estrategia MPG: (a) propuesta inicial; (b) modificación sobre la propuesta inicial.

Con esta nueva expresión para la función $mindist^i$ conseguimos que la estrategia CG siga el camino marcado por la estrategia T^2.

Resumiendo el contenido de la figura 5(a), podemos decir que, en MPG, la estrategia T^2 determina el camino a seguir, mientras que la estrategia CG ejecuta ese camino de forma precisa evitando cualquier colisión.

3.2 ALGUNOS DETALLES

La estrategia MPG, tal y como ha sido planteada en la sección anterior, hace que el robot se comporte de forma inadecuada en algunos casos. A modo de ejemplo, la figura 6(a) muestra uno de esos casos. Como se puede ver, el robot ignora el único camino/hueco que existe para poder escapar del obstáculo dentro del que se encuentra atrapado.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Pero, ¿a qué se debe esto? Buscando la respuesta a esta pregunta en el interior de MPG, nos damos cuenta que se debe a una deficiencia de la estrategia T^2. La figura 6(b) pone de manifiesto este hecho. Como se observa, cuando el robot está próximo al camino/hueco bajo consideración, la estrategia T^2 genera como salida una recta —r_T— que no apunta en dirección a ese camino/hueco.

Para solucionar el problema arriba descrito, se le ha añadido un nuevo componente a la estrategia T^2: un filtro (ver figura 5(b)). Esencialmente, ese filtro hace que no toda la información percibida por el robot sea almacenada en la memoria a corto plazo de dicha estrategia. Siendo más precisos, el criterio de filtrado que se aplica es el siguiente: sólo se consideran aquellos obstáculos que, localmente, se sabe que forman parte del contorno del obstáculo que está siendo seguido por el robot. Pongamos un ejemplo aclaratorio a este respecto utilizando la figura 6(c). Esta figura se interpreta del siguiente modo: asume que el robot está ubicado en la misma posición que en la figura 6(b); muestra, en color marrón, la porción del contorno del obstáculo que el robot ha recorrido hasta ese momento (en adelante, haremos referencia a esta porción como $S_{\vartheta O}$); muestra, en color negro, los obstáculos que están siendo actualmente detectados por el robot (además, etiqueta a esos obstáculos con la letra O y un número); muestra, en color amarillo-verdoso, los obstáculos que no están siendo actualmente detectados por el robot. Bajo la situación de la figura 6(c), el filtro de la figura 5(b) eliminará el obstáculo O_2 y dejará pasar al obstáculo O_1. La razón por la que el filtro elimina el obstáculo O_2 es porque ese obstáculo no supone una continuación de $S_{\vartheta O}$. Actuando de esta manera conseguimos que la estrategia T^2 dirija al robot en dirección al camino/hueco de escape (ver figura 6(d)). Y como consecuencia de ello, el robot acaba alcanzando su destino final (ver figura 6(e)).

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados de dos experimentos: uno simulado y otro real. Ambos experimentos pretenden que el robot escape del interior de un obstáculo formado por pasillos estrechos, largos e intrincados.

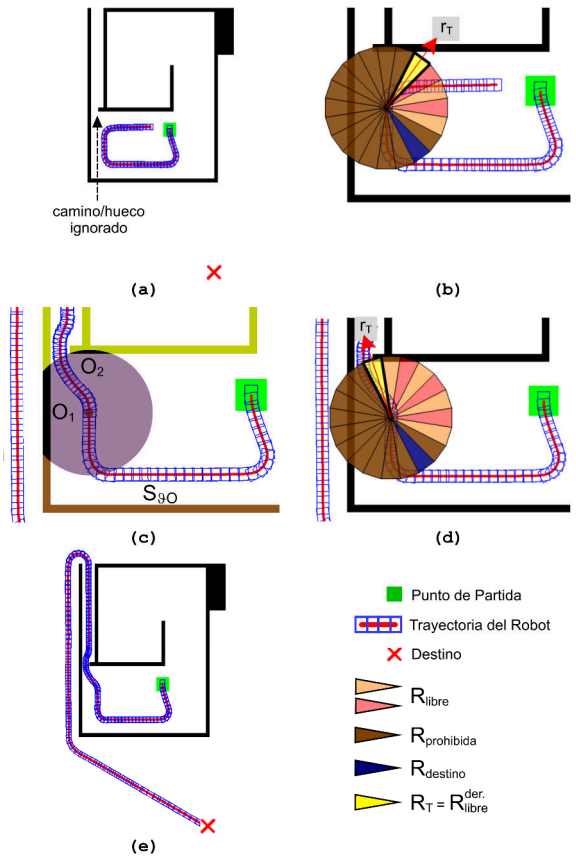


Figura 6: Problema de omisión de caminos/huecos: ilustración del problema y de la solución aportada.

En cuanto al experimento simulado, éste se ha llevado a cabo utilizando el simulador *MobileSim* de la empresa *Adept MobileRobots*. Sobre ese simulador se han implementado las estrategias reactivas T^2, CG y MPG. Cada una de estas estrategias debía controlar a un robot Pioneer P3-DX equipado con un láser que tenía una cobertura de 180º y un alcance de detección máximo de 3,5 metros. Los resultados de simulación obtenidos se muestran en las figuras 6(a) —T^2—, 7(a) —CG— y 7(b) —MPG. Como se puede observar, la estrategia T^2 deja al robot dando vueltas en el interior del obstáculo, al no encontrar el camino de salida; por otro lado, la estrategia CG encalla el robot en la primera pared larga que encuentra; finalmente, la estrategia MPG lleva al robot hasta su destino.

En cuanto al experimento real, éste se ha llevado a cabo utilizando un robot Pioneer P3-DX equipado con un láser Hokuyo URG-04LX (este láser tiene una cobertura de 240º y un alcance de detección máximo de 4 metros). Para este experimento ya sólo se ha considerado a la estrategia MPG. Como se puede ver en la figura 8(a), el entorno fue construido artificialmente utilizando cajas de cartón. La figura 8(b) muestra los resultados obtenidos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

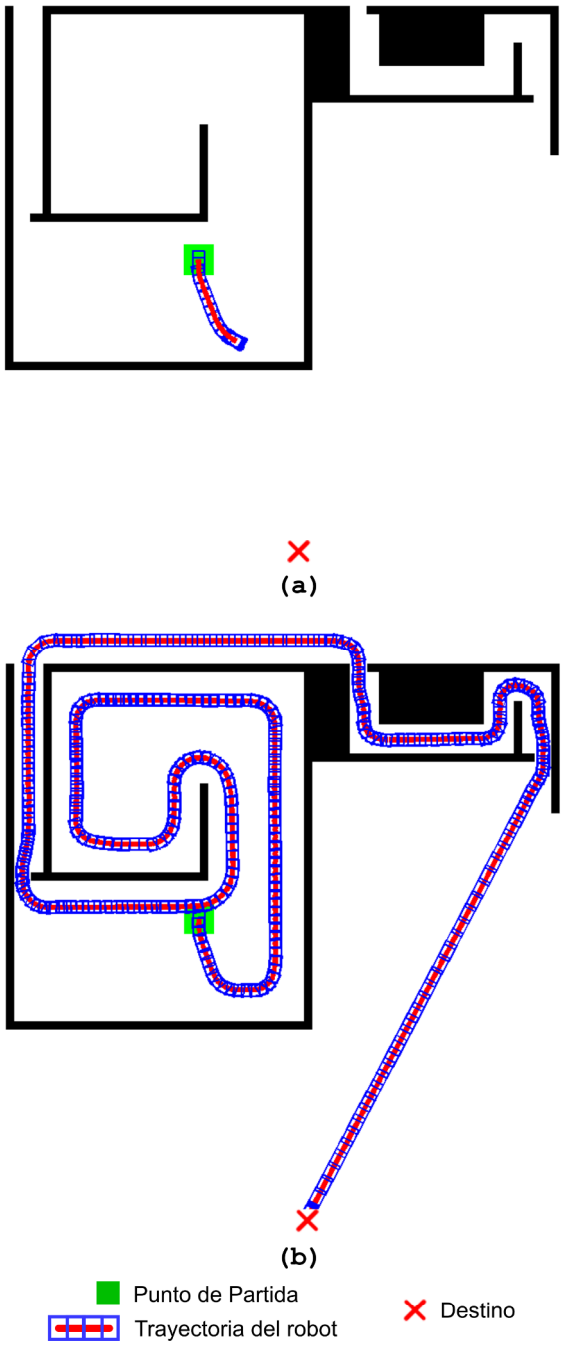


Figura 7: Resultados para CG (a) y MPG (b) del experimento simulado. Notar que, en este experimento, se asume que la estrategia MPG —en realidad, no MPG sino la estrategia T^2 que contiene— ha sido configurada en modo "tenacidad a izquierdas".

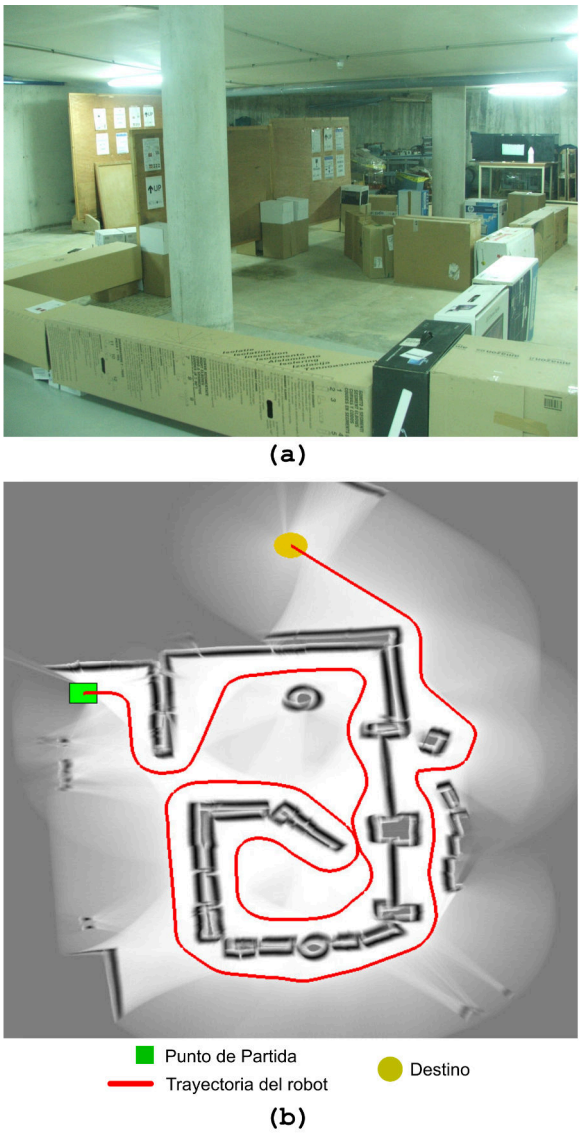


Figura 8: Resultado del experimento real. Notar que, en este experimento, se asume que la estrategia MPG ha sido configurada en modo "tenacidad a derechas". El lector puede ver un vídeo de este experimento accediendo al siguiente enlace: https://www.dropbox.com/s/nxnpwxn9m631yyd/JA_RealExp.mp4

5 ALGUNAS CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo ha presentado una nueva estrategia de control reactivo que permite que un robot pueda navegar tanto por lugares estrechos como por lugares intrincados de difícil salida. Esta nueva estrategia, denominada *MPG*, se ha obtenido mediante la fusión de otras dos estrategias ya existentes; concretamente, mediante la fusión de las estrategias CG y T^2. La realización de varios experimentos simulados y reales ha permitido evidenciar el mejor comportamiento de MPG sobre CG y T^2.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Como trabajo futuro a corto plazo, pretendemos fusionar la estrategia T^2 con algunas mejoras de la estrategia CG que han aparecido recientemente ([13,14]).

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el contexto de varios proyectos de investigación españoles y europeos: DG-R+I+D-71-2011 del gobierno de las Islas Baleares, DPI2011-27977-C03-03 del Ministerio de Ciencia e Innovación, y, por último, EU-MOVE/FP7/ 605200/INCASS de la Unión Europea. Los autores agradecen a estas instituciones la financiación recibida, sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

Referencias

[1] Brooks, R. (1986) A robust layered control system for a mobile robot, IEEE journal of Robotics and Automation, 2(1): pp. 14-23.

[2] Borenstein, J.; Koren, Y. (1991) The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 7(3): pp. 278-288.

[3] Likhachev, M.; Arkin, R. (2001) Spatio-temporal case-based reasoning for behavioral selection, International Conference on Robotics and Automation, pp. 1627-1634.

[4] Khatib, O. (1986) Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, the international journal of Robotics Research, 5(1): pp. 90-98.

[5] Mínguez, J.; Montano, L. (2009) Extending collision avoidance methods to consider the vehicle shape, kinematics and dynamics of a mobile robot, IEEE Transactions on Robotics, 25(2): pp. 367-381.

[6] Mujahed, M.; Fischer, D.; Mertsching, B.; Jaddu, H. (2010) Closest Gap based (CG) reactive obstacle avoidance navigation for highly cluttered environments, international conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1805-1812.

[7] Mínguez, J. (2005) The obstacle-restriction method for robot obstacle avoidance in difficult environments, international conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2284-2290.

[8] Fox, D.; Burgard, W.; Thrun, S.; (2002) The dynamic windows approach to collision avoidance, IEEE Robotics & Automation Magazine, 4(1): pp. 23-33.

[9] Antich, J.; Ortiz, A.; (2005) Extending the potential fields approach to avoid trapping situations, international conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1386-1391.

[10] Mínguez, J.; Montano, L. (2004) Nearness Diagram (ND) navigation: collision avoidance in troublesome scenarios, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 20(1): pp. 45-59.

[11] Durham, J.W.; Bullo, F. (2008) Smooth Nearness-Diagram navigation, international conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 690-695.

[12] Antich, J.; (2012) New reactive and path-planning methods for mobile robot navigation, tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears.

[13] Mujahed, M.; Jaddu, H.; Fischer, D.; Mertsching, B. (2013) Tangential Closest Gap based (TCG) reactive obstacle avoidance navigation for cluttered environments, international symposium on Safety, Security and Rescue Robotics.

[14] Mujahed, M.; Fischer, D.; Mertsching, B. (2013) Safe Gap based (SG) reactive navigation for mobile robots, European Conference on Mobile Robots, pp. 325-330.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control de Movimientos mediante Bus EtherCAT y LinuxCNC

I. Rosales González, V. Torres López y J.M. Gómez de Gabriel

Dto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Málaga
{narogon, vetorres, jmgomez}@uma.es

Resumen

En este artículo se describe la aplicación del bus de campo EtherCAT al control de movimientos mediante software de código abierto. EtherCAT es un protocolo de comunicación en tiempo real, de alta velocidad y muy baja latencia, basado en Ethernet que en este caso se utiliza para la coordinación del control de movimientos de un conjunto de motores sin escobillas. En concreto se ha desarrollado el control de una máquina de ensamblado de circuitos con componentes SMD, con una cinemática no convencional, basada en un robot delta de cuatro grados de libertad. Se detallan los pasos seguidos y los resultados del uso de éste bus en lugar de las tradicionales líneas analógicas 0-10V. Este artículo pretende servir de guía en la construcción de máquinas-herramienta modernas con código abierto, y su uso para la educación de los futuros ingenieros en automática.

Palabras clave: Control de movimientos, CNC, EtherCAT, LinuxCNC, Comunicaciones en tiempo real

1. Introducción

En los últimos años la robótica y la automatización se han expandido desde el ámbito industrial para llegar a un gran número de usuarios, los cuales pueden participar de ellas debido principalmente a la bajada de costes así como al aumento de las capacidades de los actuales ordenadores.

La tendencia, por tanto, es transformar los sistemas de hardware y software cerrados por otros basados en licencias de código abierto que permitan la participación y la colaboración de un gran número de usuarios. Un ejemplo es el software de control de máquinas-herramienta, LinuxCNC que cuenta con una comunidad activa de más de 5000 usuarios en su foro[4] o un chat activo las 24 horas del día lo que lo convierten en una plataforma en continua expansión con un soporte muy rápido y eficaz.

La bajada de precios en el hardware, particularmente por la entrada en escena del mercado online que posibilita la compra en casi cualquier lugar del mundo, acerca en gran medida estas tecnologías a usuarios finales. Esto ha dado lugar a diseños novedosos en muchos campos, entre los que se puede destacar la creación de impresoras 3D.

Por su lado los puertos de comunicación han tendido también a normalizarse, instalándose buses muy generalizados, como puede ser: USB, Ethernet, o CANbus; en la mayoría de los elementos.

En cuanto a la conectividad del hardware, en tiempo real, la normalización de protocolos de comunicación por parte de CiA (*CAN in Automation*) ha dado lugar a varias alternativas sobre Ethernet, véase Ethernet Powerlink[2] o EtherCAT, de código abierto y con respaldo de grandes empresas del sector.

LinuxCNC es un paquete de software libre para el control de máquinas CNC. La principal ventaja es que resuelve completamente el problema de la gestión de trayectorias y control automático de forma gratuita y abierta, lo que lo hace muy interesante para su uso docente. Como contrapartida, a pesar de su popularidad, como todo software libre su uso para casos distintos a los más convencionales y bien documentados requiere de ciertos conocimientos muy específicos y difíciles de alcanzar para usuarios noveles.

EtherCAT es un protocolo de comunicación de código abierto y alto rendimiento que pretende utilizar el bus Ethernet en un entorno industrial. El uso de este protocolo con LinuxCNC está en sus inicios por lo que no resulta trivial su puesta en marcha. Sin embargo, tal y como se demuestra en el caso práctico que se ha llevado a cabo en el contexto del presente artículo no es un objetivo inalcanzable.

Tanto LinuxCNC como EtherCAT master son software libre. El primero bajo licencia GPL (*General Public License*) y el segundo bajo la segunda versión de esta (GPLv2). Resumiendo, estas licencias garantizan la libertad de copia, distribución y modificación de los programas. Por otro lado la obligación del usuario será respetar las mismas y no coartarlas de cara a cualquier usuario, sin em-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

bargo esto no restringe los usos comerciales.

Además LinuxCNC cuenta con licencia LGPL (*Lesser General Public License*) que permite la coexistencia de codigo libre y no libre simultaneamente. Esto quiere decir que no existirá la obligación de distribuir abiertamente ni permitir la modificación de los programas o codigos creados por nosotros que funcionen sobre el software bajo licencia LGPL.

Por tanto el modelo de negocio que tiene mas sentido en este caso es la oferta de servicios adicionales al propio software: instalación y puesta en marcha, adaptación a las necesidades del cliente, soporte técnico y resolución de problemas, etc; en conjunción con el diseño e instalación del hardware necesario.

Éste es un artículo que tiene por objeto el servir de guía para la configuración y puesta en marcha del controlador de una máquina CNC con EtherCAT usando LinuxCNC.

El documento está dividido en 4 secciones. En las secciones 2 y 3 se presentan los conceptos básicos de EtherCAT y LinuxCNC. A continuación, en la sección 4, se describe el caso práctico que se ha llevado a cabo. Por último la sección 5 es una guía de inicio para la instalación y uso de LinuxCNC con EtherCAT.

2. Protocolo EtherCAT

EtherCAT es un protocolo industrial abierto. Desarrollado específicamente para aplicaciones en las que el tiempo real es un elemento crucial, usa el ancho de banda disponible en una red Ethernet estándar con una gran eficiencia. Esto se consigue mediante un circuito integrado de aplicación específica (ASIC), en todos los nodos de la red. El circuito ASIC se encarga del intercambio de datos del proceso «sobre la marcha», de manera que se reduce al mínimo el retardo del telegrama en cada nodo. Así, se dispone de un sistema de bus de campo de gran velocidad.

Las características principales del protocolo son: tiempo real (determinismo y sincronismo mediante relojes distribuidos), redundancia ante cortes en el bus de comunicación y una topología de conexionado flexible.

El protocolo EtherCAT está impulsado por *The EtherCAT Technology Group* (ETG) del cual forman parte más de 2500 empresas del sector de la automatización, entre las que Beckhoff es la desarrolladora principal.

2.1. Principio de funcionamiento

El protocolo transmite la información mediante el estándar de tramas de Ethernet IEEE 802.3, siendo su *ethertype* el 0x88a4, lo que evita modificar el marco Ethernet estándar.

La principal ventaja de este sistema radica en que los datos ya no tienen que ser enviados, procesados, y devueltos por cada nodo uno a uno, si no que en cambio, gracias al FMMU (*Fieldbus Memory Management Unit*), los datos son procesados al vuelo sufriendo solo un retraso de nanosegundos al paso por cada nodo.

Una característica fundamental del protocolo es que se comparte entre todos los esclavos un único reloj que funcionara como referencia temporal del sistema. Cada esclavo relacionará su reloj interno con el reloj de referencia, midiendo los retrasos entre los paquetes del par de ida y del par de regreso, de manera que en todo momento el tiempo en todos los elementos de la red queda completamente determinado y sincronizado.

La topología de la red EtherCAT es muy robusta, ya que forma un «anillo virtual» con ambos pares de un cable Ethernet. Las configuraciones que permite el protocolo son muy numerosas y variadas. Es posible realizar el conexionado en serie, con ramas, en árbol, etc. Incluso si se cuenta con más de una tarjeta Ethernet en el *master* se puede conectar como primer y último elemento de la red, lo que permitirá mantener la conectividad incluso si se corta la comunicación en algún punto de la red.

Una máquina EtherCAT, en cuanto a su conectividad, se comporta como una máquina de estados finitos. Cuatro, más uno opcional para actualizar el *firmware*, son los posibles estados en los que se puede encontrar: INIT, PREOP, SAFE-OP, OP y BOOTSTRAP (figura 1). En función del estado en el que se encuentre se podrán realizar intercambios de datos de forma síncrona, asignar valores de configuración o reprogramar la *eeprom* interna entre otras actividades tal y como se resume en la tabla 1.

	Comunicaciones
Init	No se permite
Pre-OP	SDO
Safe-OP	SDO y consulta PDO
OP	Completa
Bootstrap	FoE

Tabla 1: Comunicaciones en función del estado

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

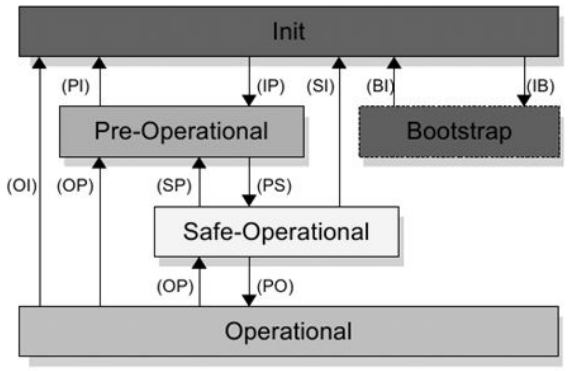


Figura 1: Máquina de estados EtherCAT

2.2. Tipo de datos

El protocolo EtherCAT permite transmitir diversos tipos de datos.

- CoE - CAN over EtherCAT
- SoE - SERCOS over EtherCAT
- EoE - Ethernet over EtherCAT
- FoE - File over EtherCAT
- VoE - Vendor over EtherCAT

Los que más nos pueden interesar son EoE que permite a un esclavo comunicarse a través de internet y CoE que será el más usado por la mayoría de los esclavos. Este estándar es una herencia del Bus CAN, y se ha mantenido en la actualidad tanto para redes que usan EtherCAT como otras como pueden ser Ethernet POWERLINK[2] o Profibus.

Dentro de los estándares que conforman el CAN y más concretamente el CANopen cabe destacar el CiA 402[5] que es el que describe el comportamiento de servodrives, variadores de frecuencia y motores paso a paso.

El protocolo CAN ordena los datos según su propósito en índices numerados en hexadecimal que van desde el 0 hasta el FFFF. En la tabla 2 se ve la clasificación.

0000	No se usa
0001 - 001F	Tipos de datos estáticos
0020 - 003F	Tipos de datos complejos
0040 - 005F	Tipos de datos específicos
0060 - 0FFF	Reservado
1000 - 1FFF	Perfil de comunicación
2000 - 5FFF	Datos definidos por fabricante
6000 - 9FFF	Datos normalizados
A000 - FFFF	Reservado

Tabla 2: Clasificación de índices CANopen

3. LinuxCNC

LinuxCNC es un software libre de control numérico de máquinas, principalmente enfocado para máquinas herramienta (fresadoras, tornos...) aunque puede ser utilizado para muchas otras aplicaciones que requieran de un control.

El software debe ejecutarse sobre un *kernel* en tiempo real, imprescindible para el control realimentado de movimientos. Actualmente es habitual usar Ubuntu 10.04 (*Lucid Lynx*) con el módulo RTAI (*Real Time Application Interface*) instalado en su núcleo.

Para la configuración e interconexión del numeroso hardware que soporta LinuxCNC, este incorpora la HAL (*Hardware Abstraction Layer*). En esta pseudocapa de hardware se cargaran todos los bloques que se necesiten. Bloques que en algunos casos representarán hardware real y en otros funciones de software. Como por ejemplo cálculos de posición para cinemáticas no triviales o funciones lógicas que puedan requerirse. Será importante diferenciar si las funciones que se cargarán realizan cálculos en punto flotante o no, pues el tiempo de ejecución varía en gran medida.

Cada bloque que se cargue en la HAL cuenta con unos pines (variables) de entrada y salida mediante los cuales reciben o envían información. Los enlaces entre pines son denominados señales en la nomenclatura de LinuxCNC.

Algunos componentes de tiempo real básicos para el funcionamiento son: Axis, Motion, Iocontrol, Halui, bloques lógicos y conversores de formato

Para definir que bloques se cargarán en nuestro entorno en tiempo real se crean archivos *.hal* que contendrán también todas las señales que se desee establecer y los valores iniciales de aquellos pines que se deseen inicializar.

Para la configuración de una máquina se crea un archivo *.ini* que incluye todos los parámetros que definen el sistema: número de ejes, grados de libertad, velocidades máximas, aceleraciones, errores de seguimiento permitidos, etc. Será también en este archivo donde se indique que archivos *.hal* han de cargarse. El esquema de configuración se muestra en la figura 2.

Además, existe la posibilidad de crear paneles de control virtuales que mostrarán por pantalla valores en tiempo real, mediante cuadros de texto, barras de colores, leds, contadores..., y permiten el control de variables por parte del usuario mediante botones, diales... todos ellos totalmente configu-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

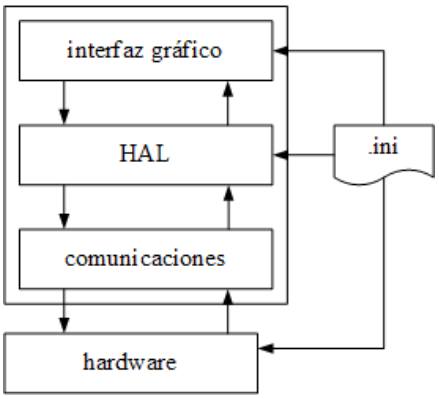


Figura 2: Esquema de configuración

rables mediante un sencillo lenguaje de etiquetas o programando en Python si se precisa una mayor personalización. Estos paneles de control serán bloques en el entorno HAL que habrán de conectarse mediante las señales anteriormente descritas.

Existen también diversas disposiciones gráficas que se pueden elegir para la pantalla principal del software. Unas enfocadas a entornos más visuales y otras más sencillas con solo texto, pasando por algunas pensadas para entornos táctiles. La más común de ellas se muestra en la figura 3.

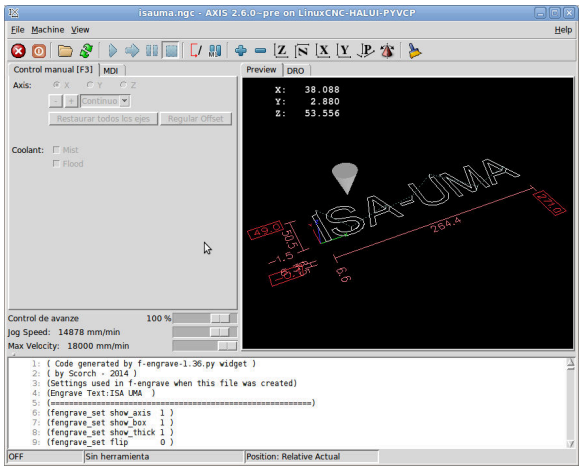


Figura 3: Pantalla principal LinuxCNC

LinuxCNC utiliza el estándar rs274[6], más conocido como código G, habitual de las máquinas herramienta, añadiendo algunos comandos especiales que aumentan las posibilidades de control.

La posibilidad de crear funciones que trabajan en tiempo real como bloques HAL es infinita puesto que el usuario solo tiene que programar el código en C y añadir una pequeña cabecera que define los pines de entrada y salida. Estos archivos se guardaran con extensión *.comp* y se pasan por un precompilador con el mismo nombre incluido en LinuxCNC que se encarga de añadir el resto de rutinas necesarias para el funcionamiento del bloque en tiempo real.

Otra de las ventajas de LinuxCNC es que permite controlar salidas mediante el mismo código G. Utiliza los comandos M64 y M65 para la activación o desactivación de los bits *motion.digital-out-xx* que al enlazarse con los pines del bloque EtherCAT quedan conectados a las salidas físicas deseadas.

4. Caso práctico

El departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Málaga dispone de un robot experimental paralelo en configuración delta (figura 4), que fue premiado en el concurso OMRON 2011/2012 de la CEA. Su movimiento originalmente era gestionado por un controlador de automatización de máquinas de la serie NJ5 de OMRON, programado mediante (*Sysmac Studio*). La función principal del robot en la actualidad es la colocación de componentes electrónicos de montaje superficial (SMD,*Surface Mount Device*) en un circuito impreso. Sin embargo, se podría adaptar con facilidad para otros fines simplemente cambiando el efector final.

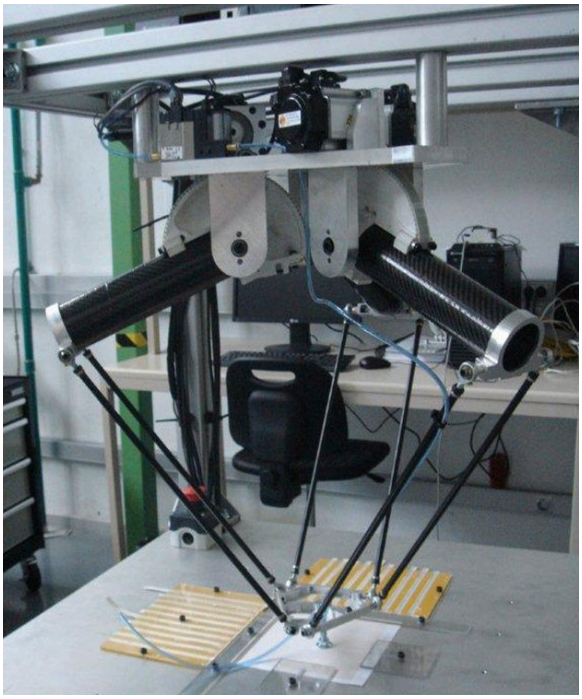


Figura 4: Robot delta de ensamblado SMD

La máquina cuenta con 4 servomotores de 200 W con *encoders* de resolución 1.000.000 (un millón) pasos/vuelta. Los *drives* son cuatro R88-KN02H-ECT de la marca OMRON.

El efector final es una boquilla de aspiración co-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

nectada a un bloque de inyección de vacío de SMC (ZX1101-K15L0Z-E55CN-Q), que se encarga de obtener los componentes SMD y retenerlos hasta que se realice el movimiento a la posición final, donde se irán colocando según su disposición en la PCB.

Lo primero que se realizó fue la retirada del controlador NJ5 y las tarjetas de entradas/salidas adjuntas al mismo así como la conexión directa del cable Ethernet al PC que actúa como maestro del Bus.

Para comprobar la conectividad de los *drives* con el pc y su correcto funcionamiento mediante EtherCAT se usó el software de Beckhoff *TwinCAT 2*. Para ello se tuvo que incluir el archivo *xml* de descripción de los *drives*, obtenido en la página web del fabricante, en la base de datos de *TwinCAT*. Este paso permite la experimentación con conceptos propios del protocolo de manera muy sencilla y visual antes de pasar a su configuración en LinuxCNC.

La empresa Ingenieurgemeinschaft IgH es la desarrolladora de Etherlab, una serie de programas enfocados a la creación y gestión de aplicaciones que usen la comunicación a través de EtherCAT en tiempo real. Entre ellos se encuentra «EtherCAT master for linux[3]» que incluye el driver para el S.O. y las funciones que el gestor de red necesita, por lo que se ha de instalar para poder dotar a la tarjeta de red Ethernet de la capacidad de transmisión y recepción de paquetes EtherCAT. Este driver no es compatible con todas las tarjetas Ethernet. Se deberá comprobar previamente si la que se va a utilizar lo es. En concreto estos son los modelos compatibles: 8139too , e100 , e1000 , e1000e , r8169.

Por último, en cuanto a conectividad, se precisa de un componente HAL que interactúe con este driver y permita la disponibilidad de los datos en tiempo real en LinuxCNC. Hay varias versiones que se pueden descargar, muchas de las cuales incluyen configuraciones por defecto para terminales Beckhoff como [13]. Sin embargo, son componentes creados por usuarios y no están totalmente revisados por lo que es posible que surjan pequeños problemas, especialmente con su uso en configuraciones distintas a las del programador original, que se deben subsanar. Uno de los problemas más comunes que se han encontrado son las distintas versiones de firmware de los terminales Beckhoff que hacen que algunos de los ajustes por defecto no funcionen.

El driver de IgH precisa de una descripción de la red que defina los elementos EtherCAT conectados (figura 5). Se tendrá que crear un archivo *xml* tomando como referencia los archivos de descripción tal y como los distribuyen los fabricantes. Este archivo debe incorporar entre otra la siguiente información: tiempo de ciclo, fabricante de cada esclavo, modelo de cada esclavo, datos que se transmitirán en tiempo real (PDO), etc.

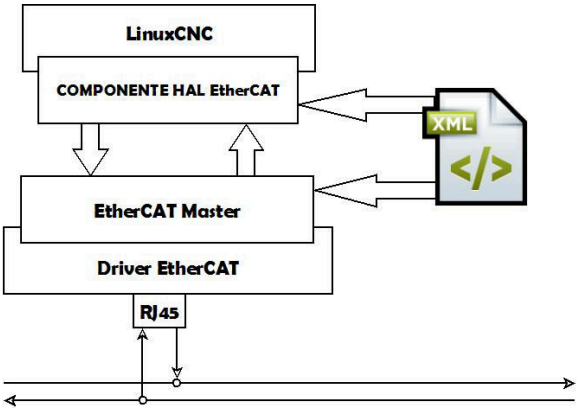


Figura 5: Configuración red EtherCAT

Los datos que se transmiten en tiempo real han de estar definidos antes de poder pasar al estado operativo para que maestro y esclavo sepan que datos han de transmitir y recibir en todo momento.

En el caso de los servos de OMRON utilizados[9] se cuenta con una serie de agrupamientos predefinidos de datos para transmitirse en tiempo real (*Fixed PDO*). Para nuestro caso se ha seleccionado el segundo grupo que permite entre otras cosas el control en posición y el cambio de modo para poder realizar la calibración inicial de la posición.

En cuanto a la situación del motor el driver se comporta como una máquina de estados finitos (figura 6). Estos estados se relacionan con el tipo de comunicación que tiene lugar. Por ejemplo para encender los motores es necesario que las comunicaciones EtherCAT estén en estado operativo (OP) y no haya errores de sincronismo.

Los índices que corresponden al control de estado y al estado actual del servodrive según el estándar CiA 402 son 0x6040 y 0x6041.

En el componente HAL de EtherCAT que se ha de cargar estos índices serán indexados como 16 bits (tal y como se especificó en el archivo *xml* de descripción de red), los cuales al enlazarse mediante señales podrán controlarse o mostrarse por pantalla de manera sencilla. Por facilidad para el usuario se ha creado una pequeña función que codifica el nombre del estado actual de la máquina según los valores de los bits siguiendo la descripción del estándar. En la figura 7 se muestra una posible salida gráfica.

Es posible realizar la configuración de los servos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

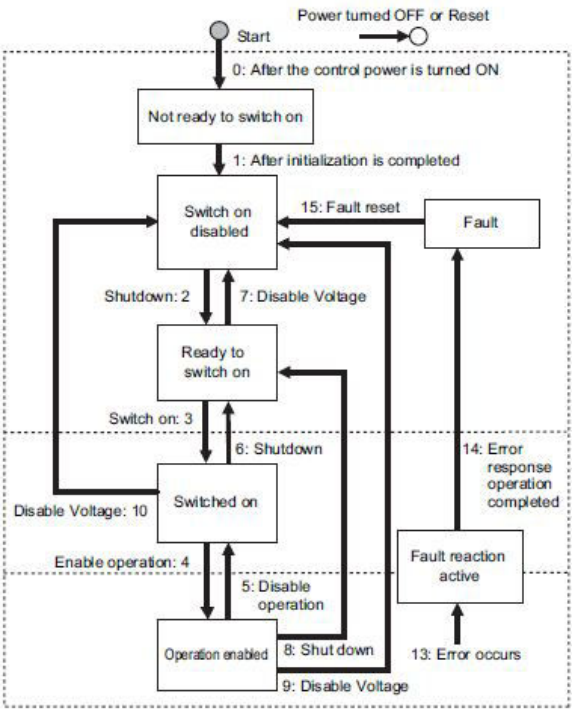


Figura 6: Diagrama de estados CiA 402

Figura 7: Panel de visualización de estados

usando directamente EtherCAT parametrizando los esclavos uno a uno mediante ordenes textuales. Sin embargo es mucho más sencillo hacerlo utilizando la aplicación de OMRON *CX-Drive* que cuenta con utilidades diseñadas específicamente para ello. La conexión se realizó mediante el puerto mini-usb de los servos y el puerto usb del ordenador. Esto no quiere decir que no sea posible configurar todos estos parámetros mediante EtherCAT, lo que habría que hacer dando valores uno a uno vía texto, si no que la manera gráfica y automatizada del software del fabricante es más sencilla.

Dado que el robot a controlar es de tipo paralelo es imprescindible disponer del modelo cinemático. Este modelo debe ser programado y cargado en la HAL tal y como describe el manual de LinuxCNC[7]

Además de los servos se han incorporado otros esclavos de otro fabricante, como muestra de la versatilidad del protocolo, que se han usado para incorporar un *joystick* que permite al usuario final el movimiento manual en los ejes X e Y, así como un par de botones que gobiernan el eje Z.

El *joystick* es un serie I de la marca PML y se compone, en esencia, de dos potenciómetros accionados con la palanca. Se alimenta con una tensión de 10 V en continua y se miden las tensiones de salida de cada potenciómetro mediante una tarjeta Beckhoff de entradas analógicas ±10 V diferencial (EL3102).

Los dos botones que hacen incrementar o disminuir la posición Z del efector final se alimentan con 24 V en continua y se conectan con una tarjeta de entradas digitales Beckhoff (EL1014).

Con todo esto se obtiene un controlador en tiempo real que gobierna el robot delta en modo automático, siguiendo la trayectoria definida mediante un archivo descrito en código G, y un modo manual mediante el *joystick*, la botonera y una interfaz gráfica software.

La precisión, repetibilidad y usabilidad conseguidas son en cualquier caso, como mínimo, equivalentes a los obtenidos antes de los cambios realizados. Además, tras sustituir el controlador propietario por uno libre las posibilidades de mejora, ampliación y modificación de la máquina son infinitas. La facilidad de uso ha mejorado también enormemente dado que no hay que restringirse al código de programación de OMRON.

5. Guía de instalación e inicio

Con la siguiente guía se pretende orientar, al menos en las etapas iniciales, a docentes y estudiantes para que sean capaces de hallar e instalar todos los elementos necesarios, para hacer funcionar su máquina mediante EtherCAT y el programa LinuxCNC.

Se necesitaran:

1. Linux 10.04 con kernel RTAI
2. IgH EtherCAT Master
3. LinuxCNC
4. Componente HAL EtherCAT
5. Archivos de descripción de cada elemento conectado en la red.

5.1. Linux

Aunque es posible la instalación de LinuxCNC sobre un sistema operativo Linux que cuente con

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

un módulo de tiempo real es preferible instalar la versión de Linux con LinuxCNC preinstalado que facilitan en su página oficial[8].

Para su instalación se recomienda hacer uso de una memoria USB para lo cual se debe utilizar algún software que la convierta en una unidad desde la que se pueda arrancar el ordenador. Por su sencillez se sugiere usar Universal-USB-Installer[12].

5.2. IgH EtherCAT master

Se descargará tanto EtherCAT-master v1.5.2 desde la pagina de IgH[3] como el directorio «debian»[1] que permitirá empaquetar el driver en un paquete *.deb* e instalarlo como tal.

Se descomprime el primer archivo descargado:

```
# tar xvfj ethercat-1.5.2.tar.bz2
```

Se copia el directorio «debian» dentro del directorio recién creado y se empaqueta el driver:

```
# cd ethercat-1.5.2
# cd debian
# ./configure -a
# cd ..
# dpkg-checkbuilddeps
# dpkg-buildpackage
```

Si tras ejecutar la comprobación de dependencias falta algún paquete necesario habrá de instalarse de la manera habitual en Ubuntu:

```
# sudo apt-get install paquete-que-falta
```

Y volver a ejecutar la comprobación hasta que todo este correcto.

Si el empaquetado ha acabado correctamente se han obtenido dos archivos: ethercat_1.5.2-1_i386.deb, ethercat-dev_1.5.2-1_i386.deb

Se instala primero ethercat_1.5.2-1_i386.deb:

```
# sudo dpkg -i ethercat_1.5.2-1_i386.deb
```

Cuando acabe la instalación se debe modificar un archivo de configuración para incluir la MAC y el driver de la tarjeta Ethernet que se va a usar:

```
# sudo edit /etc/default/ethercat
```

Para conseguir ambos datos se puede ejecutar:

```
# lshw -c networks
```

Se guardan los cambios en el archivo de configuración y se actualiza el driver.

```
# sudo update-ethercat-config
```

Por ultimo instalamos el paquete para desarrolladores

```
# sudo dpkg -i ethercat-dev_1.5.2-1_i386.deb
```

Y reiniciamos el ordenador para que arranque usando los drivers correctos.

En este momento si se ejecuta en una terminal

```
# ethercat master
```

se podrá ver información del maestro EtherCAT. Si se tiene conectado algún esclavo, se pueden enumerar ejecutando:

```
# ethercat slaves
```

5.3. LinuxCNC y componentes HAL

El siguiente paso es instalar una versión de LinuxCNC que incluya el componente HAL para EtherCAT. Se podría bajar cualquier versión e incluir el componente nosotros mismos modificando cuantos archivos fueran necesarios para satisfacer todas las referencias. Sin embargo, de nuevo por sencillez, se utilizará una versión ya modificada por un usuario.

Se descarga desde el repositorio[14] donde esta alojado. Se descomprime el *.zip* descargado y se instala siguiendo los siguientes comandos:

```
# cd src
# ./autogen.sh (Crea el programa de
configuración)
# ./configure
```

Si tras ejecutar el configurador falta alguna librería debe instalarse como en el caso anterior (subsección 5.2) y volver a ejecutarlo hasta que todas las comprobaciones sean correctas.

```
# make clean
# make
# sudo make setuid
```

Dado que se ha instalado una versión portable (*Run In Place*) de LinuxCNC habrá que ejecutar el *script rip-environment* que configura las rutas de la versión en la terminal desde la cuál se vaya a iniciarlo.

```
# . scripts/rip-environment
```

5.4. Descripción de la red

Se tiene que configurar el master indicándole que esclavos se va a encontrar conectados en la red y que información se va a compartir con cada uno de ellos en tiempo real. Para ello hay que crear un archivo de etiquetas (formato *.xml*) que interpretará el configurador (figura 5).

En el siguiente enlace[11] se pueden encontrar varias configuraciones que servirán de guía para la creación de cualquier otra.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Los datos necesarios para la creación del archivo se obtienen principalmente del archivo de descripción del esclavo que debe facilitar cada fabricante. Se puede utilizar el software TwinCAT de Beckhoff para que interprete el archivo, que en la mayoría de los casos es bastante confuso, y tomar los datos de su visualización gráfica.

Además será en este archivo donde se describan las actuaciones que hay que realizar en la transición al estado operativo (OP) o de tiempo real. En el caso de un servo, por ejemplo, habrá de definirse el modo de operación para que desde el inicio sepa cual es la consigna que debe tener en cuenta (posición, velocidad...).

5.5. Componente HAL

Los comandos para configurar el driver y cargar el componente HAL son

```
# loadusr -W lcec_conf ruta-archivo-xml
# loadrt lcec
```

Se puede comprobar el funcionamiento de los mismos desde el *halrun* (terminal de la HAL). Para ello se abre halrun y se introducen ambos comandos. Si se ejecuta show, deberán aparecer todos los pines de las variables que se declararon en el archivo *.xml*

6. Conclusiones

Se espera que la lectura de estas líneas realmente contribuya a superar las dificultades que presenta la instalación, configuración y puesta en marcha del driver EtherCAT con LinuxCNC para el control de una máquina de control numérico no convencional.

Con el caso práctico presentado se ha demostrado que los beneficios de una modernización en los buses y protocolos tradicionales a los modernos protocolos sobre Ethernet, en especial EtherCAT justifican considerablemente la inversión tanto económica como en investigación. Es por ello que día a día crece la expansión de estas tecnologías.

Por otro lado con la guía de instalación se consigue eliminar cualquier barrera que pueda suponer para docentes y estudiantes el primer acercamiento a estas técnicas.

Agradecimientos

Antonio Pérez, Andrea Maidana y Fernando Sabarit diseñaron y construyeron el robot delta sobre el que se ha trabajado en el caso práctico de este artículo.

OMRON facilitó gran parte de los componentes utilizados en la construcción del manipulador.

Los colaboradores del proyecto LinuxCNC, especialmente Sasha Ittner y Andreas Schiffler han hecho posible el uso de EtherCAT con este sistema operativo.

Referencias

[1] Archivos necesarios para empaquetar driver EtherCAT. [En línea] `https://github.com/narogon/linuxcnc/tree/add-hal-ethercat/src/hal/drivers/ethercat/master/debian`. Consultado: 01/06/2014

[2] ":::: EPSG - Homepage ::::", Sitio oficial Ethernet POWERLINK Standardization Group. [En línea]. `http://www.ethernet-powerlink.org/`. Consultado: 01/06/2014

[3] EtherCAT Master v1.5.2. Ingenieurgemeinschaft IgH. [En línea]. `http://etherlab.org/en/ethercat/index.php`. Consultado: 01/06/2014

[4] Foro oficial LinuxCNC. [En línea]. `http://linuxcnc.org/index.php/english/forum/index`. Consultado: 01/06/2014

[5] IEC 61800-7-201, IEC 61800-7-301. CiA 402: CANopen device profile for drives and motion control. 2007.

[6] ISO/TR 6983/2009. Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definition of address words. Genova, Suiza. 2009

[7] LinuxCNC team. LinuxCNC user's manual v2.5. [En línea] 2014. `http://www.linuxcnc.org`.

[8] linuxcnc.org, Autores varios. [En línea]. `http://www.linuxcnc.org`. Consultado 01/06/2014.

[9] OMRON. G5-series WITH BUILT-IN EtherCAT COMMUNICATIONS User's Manual. 2011. I576-E1-02.

[10] Pose, Florian. IgH EtherCAT master 1.5.2 Documentation. Essen : s.n., 2013.

[11] Repositorio de descripciones de redes EtherCAT. [En línea]. `https://github.com/narogon/linuxcnc/tree/add-hal-ethercat/configs/EtherCAT`. Consultado: 01/06/2014

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[12] Universal usb installer v1.9.4.5 [En línea] 2014. http://www.pendrivelinux.com/universal-usb-installer-easy-as-1-2-3/. Consultado: 01/06/2014

[13] Versión LinuxCNC con componente HAL EtherCAT incluido. Sascha Ittner. [En línea]. https://github.com/sittner/linuxcnc/tree/add-hal-ethercat. Consultado: 01/06/2014

[14] Versión LinuxCNC con componente HAL EtherCAT incluido. [En línea]. https://github.com/narogon/linuxcnc/tree/add-hal-ethercat

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Survey on Progressive Image Compression and Transmission and its application in Underwater Intervention Missions

Eduardo Moscoso, Raul Marin Prades, Jorge Sales, Pedro J. Sanz
Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores
Av. Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana (España)
Universitat Jaume I
{rubino, rmarin, salesj, sanzp}@uji.es

Abstract

This work provides a review of compression techniques that can be applied in Autonomous Underwater Vehicles for Intervention, such as the one designed for projects RAUVI, FP7 TRIDENT and TRITON. The review focuses on Progressive Image Compression and Transmission, presenting a comparative analysis of further work that can be applied in this context.

Palabras clave: Autonomous Manipulation, Underwater Application, Image Compression, Image Transmission.

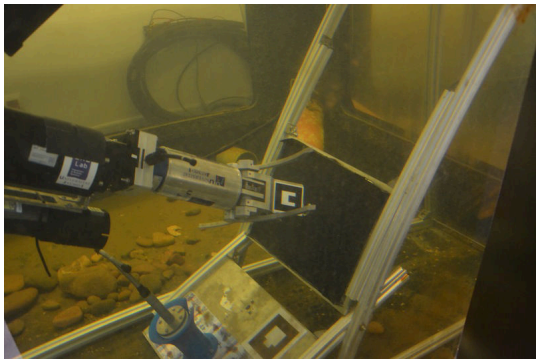


Figure 1: Autonomous Intervention in controlled indoor underwater environment at UJI: opening and closing a valve

1 Introduction

Robotic applications, and particularly Autonomous Underwater Vehicles for Intervention (AUV-I) use to focus on image input to control the system in real-time and send the information to the operator, which can normally interact with the system and adjust the task execution in a supervised manner [1]. This kind of control has been experimented in the FP7 TRIDENT Project, to perform autonomous visually guided grasping in the sea [2, 3]. Other related projects show the vision as the main input for underwater interventions, such as ALIVE [4], SAUVIM [5], and PANDORA [6]. Moreover, within the TRITON project (www.irs.uji.es/triton), the underwater vehicle performs a station docking to an underwater panel where the manipulator has to perform an intervention on a valve and a connector (see Figs. 1, 2, and 3). The arm performs the action in three steps: first of all it generates a 3D view of the panel by using a stereo camera and a laser (PCL, [7]) then, using the data from the Point Cloud, a Grasping Determination algorithm calculates the stable grasps and finally, the grasp execution is performed, always having the possibility for the operator to provide more information to the system such as alternative grasps.

Besides this, communications is a crucial subsystem in any robotic application, specially the ones that permit the user to interact remotely with the system. For that, image compression and transmission is necessary in order to send the required information at the lowest time-delay and without compromising the network and the whole system.

In this article we are going to present several progressive image compression and transmission techniques and analyse the way they can be applied to the TRITON project, considering different ways to connect the robot to the user, such as radio frequency (433/866MHZ), Sonar, and Ethernet connection through the umbilical. In fact, depending on the real scenario an Ethernet connection should be considered at a first glance. For cooperative applications where more than one robot must be included, the user will need to interact with the system at lower rates, such as radio frequency (few meters) and sonar.

As long as possible, the transmission of real images from the vehicle to the user must be considered, as they provide more information to the operator in order to adjust the autonomous behaviors or abort the operation in case of risk. Of course, the sonar solution will need to send only a very few relevant data of the intervention scenario, such as grasping points. For example, as the system provides a laser scanner for calculating the point cloud of the environment, depending on the available bandwidth the transmission of the images will be avoided, sending just the represen-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

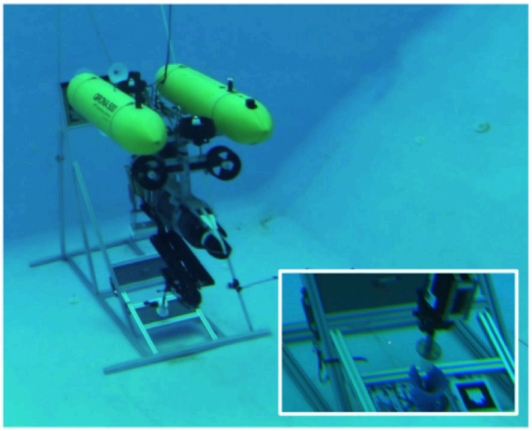


Figure 2: Autonomous Intervention in controlled indoor underwater environment: inserting and extracting a connector (hot stab)

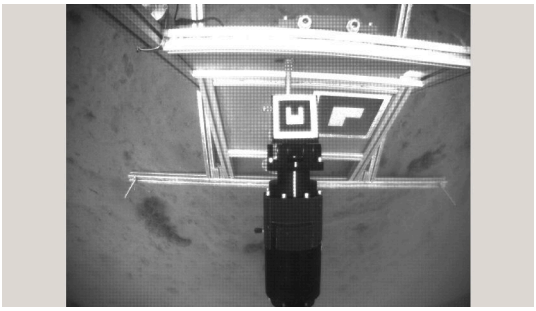


Figure 3: Image captured while underwater intervention in sea conditions

tative data of the point cloud.

Moreover, it is necessary to clarify that this article presents compression techniques can be used for underwater communications. At the moment of writing a compression image server is already implemented and the researchers are working to adapt it to the robot platform. Comparative results of the compression techniques in underwater intervention missions are expected for the next september 2014, on the AUV-I platform at IRS Lab.

2 Image Compression Techniques

The objective of image compression is to reduce its entropy in order to store or transmit it in a more efficient manner. We can also clearly distinguish between lossless and lossy compression. In lossless compression, the decompressed image will be exactly the same as the original image while, in lossy compression, the decompressed image will be an approximation of the original image.

Digital images usually have 3 color components which means that what we perceive as one color image is (without loss of generality), in fact, composed of a luminance channel (black and white version of the color image) and 2 color difference channels (which can usually be subsampled without much loss - see HVS below).

Progressive image compression is such that it is trivial and very inexpensive in terms of processing power (there is no need to decompress and recompress the image) to supply an image which is either resolution or quality progressive, meaning that the image data can be truncated at any point and we would still get a lower resolution or quality version of the original image (in this sense, lossless streams can become lossy by simple truncation). In the case of color images, we could also prepare the image in such a way that a monochrome version of it could be obtained with the same progressive characteristics as before.

As opposed to video compression, image compression does not address the compression of the high temporal correlation between adjacent frames in a video sequence, i.e., in the context of a video sequence, image compression is also known as intra-frame or key-frame compression. In fact, the reason why video compression actually compresses so well is that the highest gains come from an adequate compression of the temporal information using preceding and/or succeeding frames to actually predict the current frame and code the error between the current and the predicted frames. This prediction is usually done with the help of motion estimation and compensation and is usually quite a computation-intensive task (most video compressors are highly asymmetric, where the compressor is usually slower than the decompressor). The resulting compressed frames are called inter-frames or delta-frames.

In order for the decoder to be able to properly synchronize in case of a frame error or loss, or to be able to have some level of random access to the compressed stream, or to simply better adapt to changes in the image sequence, the compressor periodically inserts intra-frames in the compressed stream, as seen on figure 4.

It is worth noting that most video compression schemes allow for forward (P-frames) and backward (B-frames) predicted frames. Needless to say, B-frames increase the latency and the amount of buffering needed in exchange for better compression ratios.

It is important to note that, even though the final objective of image compression is reduction in size, many other factors come into play when discussing actual algorithms. For example, if the reduction

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

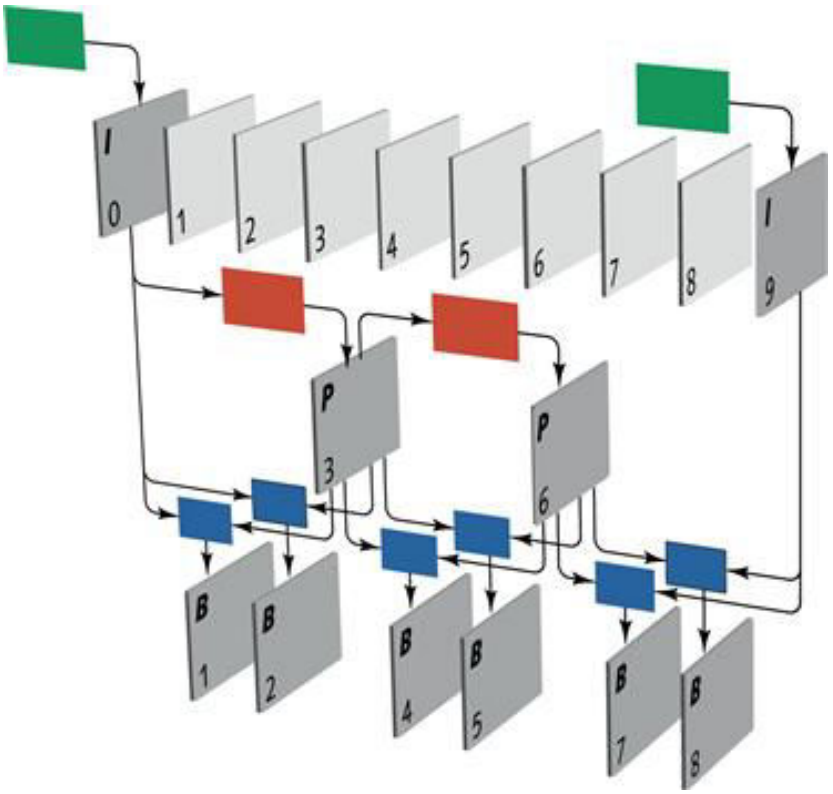


Figure 4: Group Of Pictures (GOP)

is size is such that the time taken for compression and transmission is smaller than transmitting the uncompressed image, we may say that the objective of compression is reduction of the transmission time of the image! Other factors such as latency or delay play a very important role in the design of an image and/or video compression algorithm, as well as random access to past frames, among others.

We will leave the important subject of video compression to another opportunity and focus in image compression for the rest of this document but it is important to note that there can also be progressive video compression which can share the same quality and resolution scalability as image compression and even temporal scalability in some cases.

With the ever increasing size and quality of captured images, even good quality compressed images are quite large and its transmission will most likely take most of the available bandwidth. Depending on the application, we may not need to send an image with full resolution, quality, and color information in order to fulfill our needs. Also, it is usually not practical to simply encode the image multiple times, one for storing and others for each transmission of a desired (resolution, quality, color) image. In the case of retrieval of stored images, it is usually not acceptable to decompress the high quality stored image and recompress it to the desired (resolution, quality, color) image for transmission.

It must be noted that, while image compression quality is usually measured objectively by means of MSE (Mean Square Error), there is a lot of subjectivity in it. It is quite usual to use the HVS (Human Visual System) [8] model to compensate for the human eye characteristics while compressing an image. This will most likely result in a lower quality image in the objective sense being perceived as higher quality image by a human observer.

For example, for the monitoring of security cameras in real time, it is not necessary to have neither high resolution nor high quality but, when searching for details on an image we need all the resolution, quality, and color we can get! Also, while browsing an image sequence database to find a frame that represents a certain moment when an event occurs, there is no need for high quality and resolution and, when this frame is found, it can be retrieved with full quality, resolution, and color so that it can be analyzed in all its available detail. Such a scheme would allow for much faster searches, specially if these searches are done remotely, by minimizing the bandwidth and pro-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cessing needs.

Therefore, compression in general and image compression in particular is a very application specific task, with many available tradeoffs and many different algorithms that try to maximize (or minimize) some design criteria. Most image compression algorithms are lossy algorithms designed with the sole purpose of minimizing the resulting size of the image with minimal regard to its execution latency and, in most cases, the whole data is necessary in order to be able to decompress it.

Fortunately, there is a class of image compression algorithms that possess many desirable properties simultaneously and which can also be implemented very efficiently, with complexity similar to the JPEG standard in uniprocessors [9], and with less latency in modern multi-core processors by taking advantage of algorithm parallelism. These algorithms possess the following properties:

- lossless/lossy
- quality scalability
- resolution scalability
- color channel scalability
- random access
- ROI (Region Of Interest)

among others (some algorithms may combine many of the above attributes simultaneously).

Scalable compression usually takes advantage of multiresolution signal decomposition, which is natural for wavelets but can also be used with DCT [10] or other block transforms by simply rearranging its coefficients. The coefficients are sent either in bitplane order across all frequencies (resolution) or frequency order across all bitplanes (quality), or a combination thereof, achieving the desired scalability. During compression special markers can be inserted to separate the color components and also to introduce futher blocking within the frequency bands to achive the desired color scalability and random access, respectively. Also, bitplane shifting can be used to introduce region of interest (ROI), as long as its positions and shapes are transmitted as side information to the decoder.

A few of the known progressive algorithms are EZW (Embedded Zerotree Wavelet) [11] , SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees) [12], SPECK (Set Partitioning Embedded bloCK) [13], EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) [14] which is the algorithm used for the JPEG2000 standard [9], among others. It should be noted that there are many extensions and variations for all these algorithms and most of them don't have an optimized implementation readily available. This means that an efficient implementation, preferably parallel, should be developed so that it can be deployed in a real-world scenario.

For realtime communications a cleverly designed protocol could be used which uses simultaneous channels and receiver feedback so that the transmitter could send low resolution low quality images on the primary channel and, based on the receiver feedback timing, could send additional information on other channels based on available bandwidth. As long as there is a possibility of prioritizing the packet delivery on the primary channel in relation to higher channels, the main image will take precedence over the additional information and will arrive at the destination with minimal delay. The same can be done regarding a second channel in relation to a third one and so on.

Frame rate could also be controlled by using multiple channels or by limiting it so that the primary channel will try to prioritize image quality and resolution once the desired frame rate is achieved.

This way, we can arrange for dynamically adjustable channel usage and prioritize new information and frame rate in relation to resolution or quality information.

3 Conclusions

In this paper, the problem of controlling AUVs-I in real-time and the need to send information to allow a supervised control has been introduced. Communication is a crucial subsystem in any robotic application, specially the ones that permit the user to interact remotely with the system. For that, image compression and transmission is necessary in order to send the required information at the lowest time-delay and without compromising the network and the whole system. To tackle this issue, several progressive image compression and transmission techniques have been presented, considering different ways to connect the robot to the user, such as RF, Sonar and Ethernet connection through the umbilical. Further work will focus on the implementation of the selected algorithm on the AUV-I platform at IRSLab.

Acknowledgements

This research was partly supported by Spanish Ministry of Research and Innovation DPI2011-27977-C03 (TRITON Project), by Universitat

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

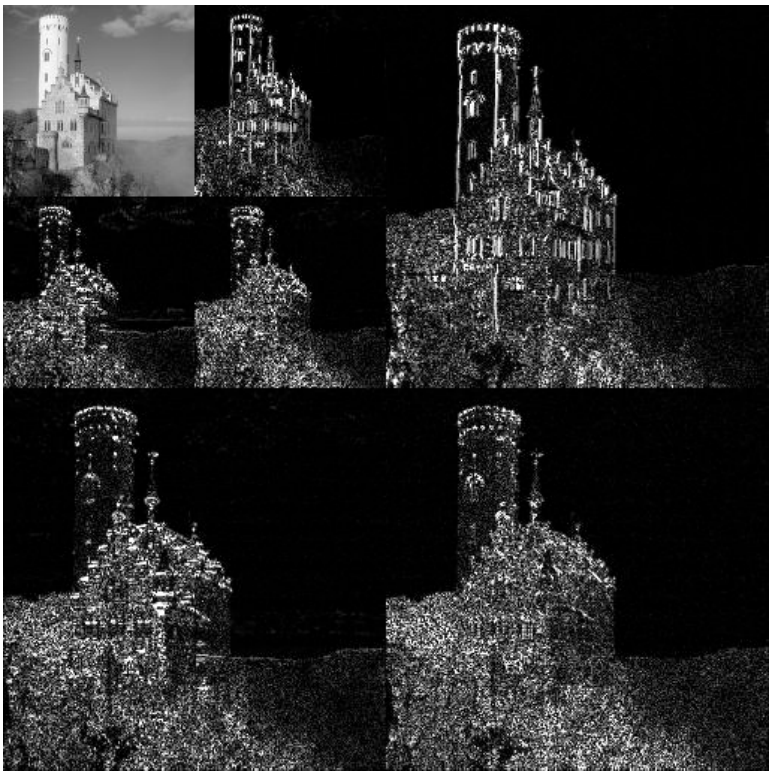


Figure 5: 2 level wavelet decomposition

Jaume I and Foundation Caixa Castelló-Bancaixa under grant PI·1B2011-17 and by the programme Ciencia Sem Fronteiras del Brasil.

References

[1] P. J. Sanz, M. Prats, P. Ridao, D. Ribas, G. Oliver, and A. Orti, "Recent progress in the RAUVI project. A reconfigurable Autonomous Underwater Vehicle for Intervention," in *52-th International Symphosium ELMAR-2010*, Zadar, Croatia, September 2010, pp. 471–474.

[2] M. Prats, A. P. del Pobil, and P. J. Sanz, *Robot physical interaction through the combination of vision, tactile and force feedback. Applications to assistive robotics*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 84. Springer Publishing Company, Incorporated, 2013.

[3] P. J. Sanz, P. Ridao, G. Oliver, G. Casalino, Y. Petillot, C. Silvestre, C. Melchiorri, and A. Turetta, "TRIDENT: An european project targeted to increase the autonomy levels for underwater intervention missions," in *OCEANS'13 MTS/IEEE conference. Proceedings*, San Diego, CA, 2013.

[4] J. Evans, P. Redmond, C. Plakas, K. Hamilton, and D. Lane, "Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation," in *OCEANS 2003. Proceedings*, vol. 4, Sept 2003, pp. 2201–2210.

[5] G. Marani, S. K. Choi, and J. Yuh, "Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 15–23, 2009.

[6] FP7-PANDORA, "Persistent Autonomy through learNing, aDaptation, Observation and Re-plAnning (PANDORA)," http://persistentautonomy.com/.

[7] R. Rusu and S. Cousins, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, May 2011, pp. 1–4.

[8] D. LEVICKY and P. FORIS, "Human visual system models in digital image watermarking," *Radioengineering*, vol. 13, no. 4, pp. 38–43, Dec 2004.

[9] W. B. Pennebaker and J. L. Mitchell, "JPEG Still Image Data Compression Standard," New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[10] Z. Xiong, O. Guleryuz, and M. Orchard, "A dct-based embedded image coder," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 3, no. 11, pp. 289–290, Nov 1996.

[11] J. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 12, pp. 3445–3462, Dec 1993.

[12] A. Said and W. Pearlman, "A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 243–250, Jun 1996.

[13] W. Pearlman, A. Islam, N. Nagaraj, and A. Said, "Efficient, low-complexity image coding with a set-partitioning embedded block coder," *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 11, pp. 1219–1235, Nov 2004.

[14] D. Taubman, E. Ordentlich, M. Weinberger, and G. Seroussi, "Embedded block coding in {JPEG} 2000," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 17, no. 1, pp. 49 – 72, 2002, {JPEG} 2000.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MARCO PARA EL ANÁLISIS DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN 3D OBTENIDA CON ESCÁNERES LÁSER

Pilar Merchán
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas s/n. 06006 Badajoz. Spain.
pmerchan@unex.es

Santiago Salamanca
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas s/n. 06006 Badajoz. Spain.
ssalamanca@unex.es

Antonio Adán
Escuela Superior de Informática. Universidad de Castilla la Mancha. P. Universidad, 4. 13071 Ciudad Real.
Antonio.Adan@uclm.es

María José Gómez
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas s/n. 06006 Badajoz. Spain.
mariajosegs1990@hotmail.es

Resumen

Abstract

Este artículo presenta un método original para el análisis de las propiedades geométricas y ópticas de los colectores parabólicos que conforman una central termosolar utilizando escáneres láser, que han demostrado ser dispositivos ideales para la adquisición de los espejos parabólicos en campo. El objetivo de este artículo es proponer una metodología de análisis de los errores geométricos de los espejos, así como una forma empírica de medir uno de los factores que más influyen en la eficiencia energética de una planta termosolar: la eficiencia óptica.

El método presentado comienza con el procesado de los datos 3D provenientes del sensor láser e incluye la definición de un conjunto de parámetros que caracterizan y evalúan errores en la superficie del espejo parabólico, desviaciones en la posición del tubo receptor e índices energéticos del colector. Puede aplicarse a centrales en funcionamiento, lo que supone una novedad respecto a la mayoría de los métodos propuestos hasta el momento, aplicables solamente en la fase de diseño de los espejos y las estructuras. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas in-situ son lo suficientemente buenos como para recomendar su uso a investigadores y gerentes de plantas termosolares.

Palabras Clave: Colectores cilindro-parabólicos, plantas termosolares, escáneres láser, procesado 3D, superficies 3D.

1 INTRODUCCIÓN

Las tecnología termosolar constituye uno de los medios más importantes de convertir energía solar en energía eléctrica. En la planta termosolar, grandes espejos parabólicos reflejan la radiación concentrándola en un tubo receptor lineal situado en el centro de la parábola, por donde circula el líquido caloportador (HTF, *heat tansfer fluid*) (Figura 1). Este líquido se calienta gracias a las grandes temperaturas obtenidas con la concentración de la radiación solar, es conducido por una serie de intercambiadores de calor donde se utiliza para producir vapor a alta presión, que a su vez alimenta una turbina de vapor convencional para producir electricidad [1].

Existen muchos factores que afectan al rendimiento de una planta termosolar, entre ellos, las sombras entre los colectores, los errores en el seguimiento solar de los espejos, la pérdida de reflectividad de los mismos debido a suciedades, etc. Pero, por encima de todos, las debilidades mayores son las provenientes de errores ópticos. Cuando éstos aparecen, los rayos solares no tocan el tubo absorbedor situado en el foco de la parábola, y por tanto, el fluido caloportador no se calienta a la temperatura necesaria. Por tanto, la calidad geométrica de los colectores solares es imprescindible para garantizar un rendimiento adecuado en una planta termosolar.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Figura 1: Colector cilindro-parabólico
(Fuente: http://blog.shankbone.org).

Es por esto que en los últimos años se han propuesto métodos que tratan de analizar las diferencias entre la posición ideal del foco y la que realmente tiene en la planta solar. Entre ellos, la fotogrametría puede ser, quizás, el más popular [2]. Sin embargo, esta técnica necesita blancos que faciliten el proceso de triangulación para completar el análisis. Esto supone una limitación importante, pues se tarda demasiado tiempo en colocar estos blancos una vez que los espejos están instalados en la planta. Otro tipo de análisis puede realizarse con el llamado *Video Scanning Hartman Optical Test (VSHOT)* [3], que fue diseñado inicialmente para evaluar concentradores planos (Fresnel), y se modificó después para ser utilizado en concentradores parabólicos [4]. La disposición experimental del VSHOT es tan compleja y el tiempo de adquisición tan alto, que se hace realmente difícil utilizar el método en plantas reales. Los sistemas basados en deflectometría [5] presentan limitaciones similares a estas dos propuestas, de forma que se puede concluir que ninguna de las propuestas desarrolladas hasta el momento es válida para estudiar la geometría de los espejos una vez que estos están en funcionamiento en la planta, aunque han demostrado ser útiles en las fases previas de diseño de las estructuras y los espejos.

En este artículo presentamos un método que puede ser utilizado en espejos parabólicos instalados en plantas en funcionamiento. Utilizamos un escáner láser, capaz de adquirir millones de datos 3D en pocos minutos. Sin embargo, es necesario establecer un marco teórico que proporcione un análisis correcto de los datos, eliminando la influencia de los datos espurios que se obtienen junto a los reales y que son debidos a la tecnología utilizada. Los resultados experimentales obtenidos con datos reales tomados en una planta en funcionamiento ratifican la utilidad de este tipo de sensores para el estudio de la geometría de los espejos, y validan el marco teórico propuesto. Además, se define un índice que mide la concentración de rayos solares en el tubo absorbedor al que se ha llamado *índice de concentración*.

El artículo se ha estructurado de siguiente manera: la sección 2 explica el marco teórico propuesto, las distintas etapas del procesado de los datos 3D y del análisis de las superficies parabólicas llevado a cabo; la sección 3 muestra los resultados experimentales obtenidos y, por último, en la sección 4 se describen las conclusiones y los trabajos futuros.

2 MARCO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS 3D

Como se ha dicho en la introducción, en esta sección se explica el marco general desarrollado para la caracterización geométrica y energética de colectores solares.

El proceso de captura y tratamiento de los datos permite obtener los puntos que describen la forma de los captadores solares y prepararlos para su análisis. Este proceso no depende de cuál captador es el estudiado, tampoco depende del lugar desde el que se hayan tomado los datos, ni de la posición u orientación del captador respecto a dicho lugar (referencia). Esta versatilidad permite repetir el proceso para diferentes datos de entrada (fruto de variar las consideraciones anteriores) y así obtener distintas imágenes tridimensionales tratadas para su posterior análisis.

El método desarrollado consta de tres etapas: adquisición, procesado y análisis de los datos 3D.

2.1 ADQUISICIÓN DE LOS DATOS 3D

La etapa de adquisición de datos tiene como objetivo obtener una representación realista, detallada y fiel de la superficie que va a ser analizada. Pensamos que la maniobrabilidad, facilidad de uso y rango de medidas, junto a la velocidad y precisión que ofrecen los escáneres láser de tiempo de vuelo los hacen idóneos para su uso en instalaciones reales en funcionamiento.

El principal inconveniente que presentan estos sensores es que no funcionan bien con superficies reflectantes, como es el caso de los espejos parabólicos de los colectores solares. Por eso decidimos escanear la parte trasera de los colectores, por lo que es requisito indispensable que esta parte esté limpia.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.2 PROCESADO DE LOS DATOS 3D

El análisis de la geometría del colector escaneado se realiza por comparación con una superficie teórica. Para ello, se hace necesario comenzar el análisis con un pre-procesado que elimine los datos erróneos y espurios. La Figura 2 representa la secuencia que define la etapa de procesado de los datos.

Por una parte, se genera un modelo teórico de la superficie del colector con sus mismas dimensiones, que simulará la superficie formada por los espejos de un captador solar ideal; por otra parte, se realiza la limpieza de los datos adquiridos. A continuación, las superficies real y teórica son alineadas, de forma que ambas tienen la misma posición y orientación con respecto a un sistema de referencia común. Al final de esta etapa se realiza un filtrado de los datos reales.

2.2.1 Generación del modelo ideal

La superficie teórica es obtenida utilizando las ecuaciones de un cilindro parabólico. Una superficie cilindro-parabólica no es una superficie cilíndrica de revolución, por lo que se genera mediante la proyección longitudinal de una parábola. La generación de un cilindro de una determinada longitud estará definida por la proyección de la curva directriz, es decir, de la parábola a lo largo de dicha longitud. La ecuación que la describe es:

$$z = \frac{x^2}{4 - f} \qquad (1)$$

En donde f es la distancia focal. Esta ecuación es válida para todos los puntos del cilindro, pues se trata de una superficie uniforme a lo largo de su longitud (eje y). Puesto que el modelo ideal es construido con los datos geométricos de los captadores reales, la superficie resultante debe ser muy parecida a la real, diferenciándose únicamente en pequeñas desviaciones, debidas al mal ajuste de los espejos, a deformaciones producidas por el peso, defectos en la estructura soporte, etc. La Figura 3 muestra la nube de puntos de una superficie 3D ideal generada de esta forma.

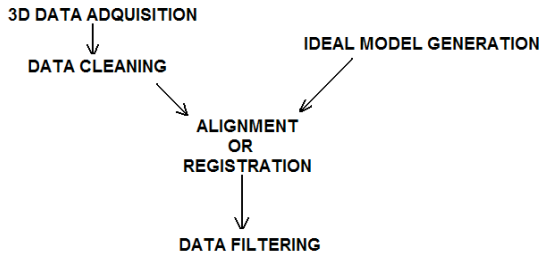


Figura 2: Esquema del procesado de los datos 3D

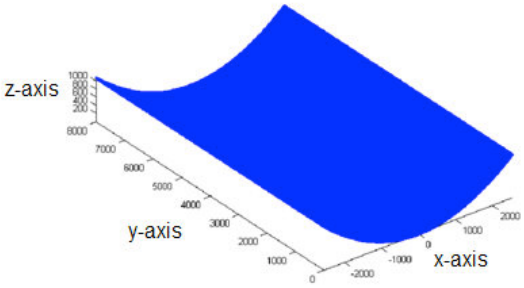


Figura 3: Nube de puntos de la superficie 3D ideal.

2.2.2 Limpieza

En términos estadísticos, cuando se toma una muestra de una población, en ella pueden aparecer elementos atípicos, que son los que presentan valores alejados de la media. Si estos valores atípicos permanecen en la muestra durante todo el estudio, los resultados obtenidos serán erróneos y confusos, por ello es importante eliminarlos en esta etapa.

Los puntos a eliminar pueden ser clasificados dentro de una de estas tres clases:

- Puntos que pertenecen a la estructura metálica que soporta la superficie parabólica.
- Además, existen zonas de la superficie que no siguen la geometría cilindro-parabólica. Se trata de recovecos necesarios para la sujeción de la superficie o juntas entre distintas placas de espejo. La función de estas partes de la superficie atiende a necesidades estructurales y no a la reflexión de los rayos solares, por tanto, tampoco pertenecerán a la superficie especular que queremos analizar.
- Puntos erróneos generados por el propio escáner.

2.2.3 Alineación o registro

Como es sabido, alinear dos imágenes consiste en superponer una sobre la otra, de modo que ocupen la misma posición respecto al origen de coordenadas global. Solapando las imágenes será posible comparar las características geométricas de ambas superficies. En el proceso de alineación, la nube de puntos que describe a la superficie teórica permanece fija, mientras que la adquirida por el sensor se va moviendo hasta que se alcanza el mejor solapamiento.

El proceso se divide en tres etapas:

- Registro manual basado en la elección de pares de puntos en ambas superficies.
- Registro automático aplicando algoritmos de ICP [6,7].

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

- Registro manual con respecto a un sistema de referencia, dado que la falta de características peculiares en las superficies puede suponer una dificultad, especialmente en la alineación automática. Debido a que la geometría de un cilindro parabólico es uniforme en la dirección de las generatrices, puede que tras la alineación automática la superficie real aparezca trasladada respecto a la teórica en esta dirección, que en nuestro caso es la dirección del eje y, por lo que hay que corregirlo manualmente con un simple desplazamiento del eje y.

Aunque el registro manual pueda parecer una debilidad del método, encontrar una solución automática no es trivial. Se podría pensar, por ejemplo, en incluir marcas (etiquetas adhesivas) sobre los espejos cilindro-parabólicos para usarlas en un proceso automático. Posiblemente ésta no sea la solución definitiva para obtener dicho registro pero, aunque éste se obtuviese, lo que sí es evidente es que la colocación de estos elementos no es ni factible ni rentable desde el punto de vista del tiempo necesario para realizarlo. Hay que recordar que el método que se propone en este artículo está pensado para ser empleado en plantas termosolares que estén en explotación.

2.2.4 Filtrado

Al final de la etapa de registro quedan en la nube puntos que, aunque cercanos a la superficie del colector, no pertenecen a él. Estos puntos no pueden ser eliminados de forma manual, sino tras un proceso de filtrado. Este filtrado consta de tres etapas:

- En la primera, para cada punto de la superficie teórica tomamos el punto más cercano de la superficie real. Se trata de una correspondencia de puntos entre ambas superficies, seleccionando aquellos que más se aproximan al modelo ideal.
- En la segunda fase se calcula el valor medio y la desviación estándar entre los puntos emparejados anteriormente y se eliminan aquéllos cuyas distancias sean mayores, en valor absoluto, a 3 veces la desviación. Éstos se corresponden con los *outliers* de la distribución.
- Puede ocurrir que un mismo punto de la superficie real sea el más cercano para varios de la teórica, y por lo tanto ese punto será almacenado varias veces. En la tercera etapa eliminamos estas redundancias.

2.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS 3D

En esta etapa se analiza la geometría de los captadores solares. El análisis se basa en el estudio de las principales características geométricas y físicas de los superficies cilindro-parabólicas, y se realiza mediante la comparación de los valores de los parámetros calculados para la superficie real y la teórica. La Figura 4 muestra las etapas que definen el método de análisis.

Tras las etapas de adquisición y procesado de los datos, sólo se tienen disponibles nubes de puntos. Es preciso definir las superficies utilizando las relaciones topológicas existentes entre los puntos que forman dichas nubes [8]. Por tanto, antes de realizar cualquier análisis, es preciso definir una estructura de datos adecuada.

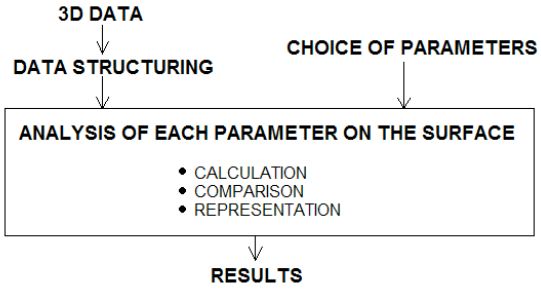


Figura 4: Diagrama del procesado de los datos 3D

Para cada superficie los parámetros a estudiar son:

1. Distancias entre las superficies real y teóricas.
2. Situación de la línea focal respecto a su situación ideal.
3. Índice de intercepción en el tubo absorbedor.

2.3.1 Estructura de datos

Este primer paso tiene como objetivo el de proporcionar una estructura topológica a los datos 3D que se han adquirido con los sensores láser.

Para ello los datos se almacenan en una matriz, similar a una imagen de rango, en la que en posiciones consecutivas se almacenarán coordenadas 3D, de los datos escaneados, que se encuentran cercanos (Figura 5).

La razón por la que los datos se estructuran de esta forma es la de facilitar la comparación de los datos teóricos y los datos reales, y el cálculo de los parámetros de interés.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Los resultados que se vayan obteniendo se acumularán en una matriz del mismo tamaño que la utilizada para almacenar los datos.

2.3.2 Análisis de la distancia entre la superficie real y teórica

El método más rápido para determinar las zonas en las que los espejos cilindro-parabólicos (superficie real) se alejan más de la superficie ideal, es determinando la distancia entre ambas.

Para ello se calcula para cada coordenada x de la matriz de datos reales (la coordenada y es la que define la directriz de la superficie paraboloide) la coordenada z que teóricamente debería tener. Ésta se compara con el valor de z almacenada en la matriz de datos reales y la distancia entre ellas se almacena en una matriz de distancias.

Esta matriz se puede representar como una imagen en pseudo-color, lo que proporciona información de posibles defectos en la superficie. En la Figura 6 se muestra un ejemplo.

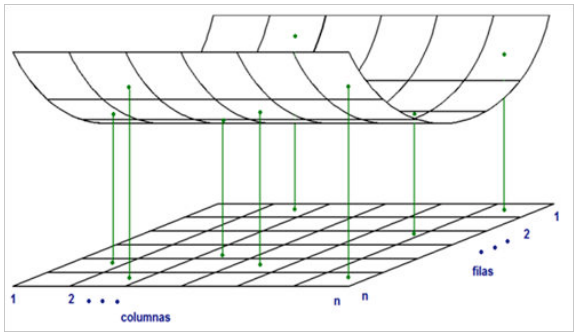


Figura 5: Estructuración de los datos 3D

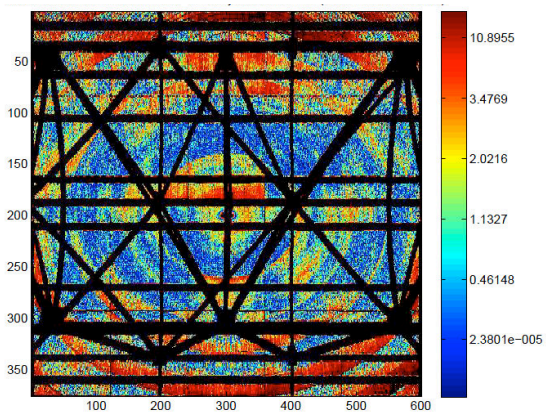


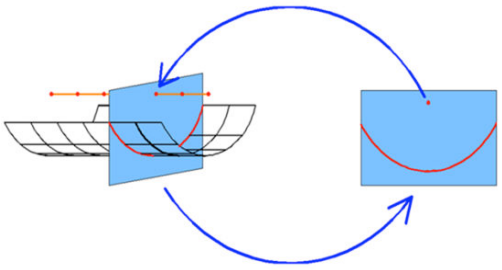
Figura 6: Ejemplo del resultado de la comparación de una superficie real e ideal. En rojo se indican las mayores distancias y en azul las menores (ver barra de color de la derecha).

2.3.3 Análisis de la línea focal

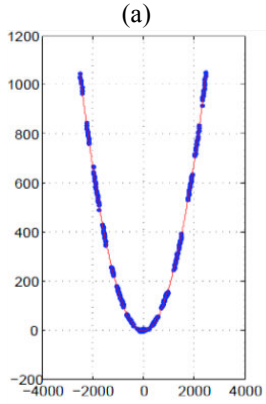
Uno de los análisis más importantes en los espejos cilindro-parabólicos es el de la posición de la línea focal, ya que es ahí donde se ubica el tubo absorbedor. En este apartado se propone un método que permite comparar la línea focal real con la teórica o ideal.

Para el cálculo de la línea focal de los datos reales se parte de los datos almacenados en cada una de las columnas de la matriz de datos reales. Estos datos disponen de la misma (o muy similar) coordenada y, por lo que los datos que se encuentran en cada columna son las que coincidirían con un corte según la línea directriz de la superficie cilindro-parabólica. Tras extraer estos datos de la matriz de datos reales, se realiza una aproximación por mínimos cuadrados de la parábola que mejor se aproxima a dichos datos. Se determina el foco de esa parábola teórica, que es el que se considera que correspondería con el foco real. La Figura 7 muestra un ejemplo de lo explicado.

Una vez determinadas las posiciones de los focos para todos las columnas de la matriz de datos reales, éstas se puede representar en una gráfica con respecto a la coordenada y. Si en la misma gráfica se representa la línea focal ideal, se puede analizar la discrepancia entre la línea focal real y la teórica. En la Figura 8 se muestra un ejemplo.



(a)



(b)

Figura 7: (a) Corte sobre la superficie cilíndrico-parabólica al seleccionar una columna de la matriz de datos reales. (b) En azul se representan los datos extraídos y, en línea continua, la parábola que mejor se aproxima a los datos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2.3.4 Cálculo del índice de intercepción

El objetivo de un colector solar es reflejar la radiación solar hacia el tubo absorbedor que se encuentra en la línea focal. Cuanto mayor sea el porcentaje de rayos que llegan al tubo, mayor será el rendimiento de la planta termosolar. A este porcentaje se le denomina *índice de intercepción* y, como es obvio, será mayor cuanto más se aproxime la superficie real a la ideal.

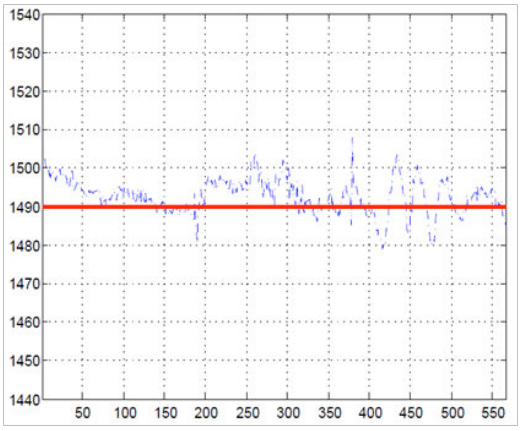


Figura 8: Comparación entre la línea focal real (azul), y la línea focal ideal (rojo).

La primera ley de la reflexión indica que "El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal, que se llama ángulo reflejado". Por ello, el cálculo del índice de intercepción está directamente relacionado con el cálculo de las normales a la superficie cilindro-parabólica. A partir de la matriz de datos reales, las normales para cada coordenada almacenada en la posición *(i, j)* se calculará determinado el valor medio de los vectores normales de cada unos de los triángulos cuyos vértices son *(i, j)* y sus vecinos.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de calcular el índice de intercepción es la orientación de los espejos cilindro-parabólicos con respecto a los rayos del sol. Para este estudio se supondrá que esta orientación es ideal, es decir, se considera que el sol se encuentra según el eje *z* y los rayos del sol inciden paralelos a este eje.

Una vez determinados los vectores normales y decidido la dirección de los rayos de sol con respecto al colector, se calculan las rectas de reflexión, que no son más que la rectas que están en el mismo plano que el rayo incidente con el vector normal y que forma un ángulo igual al ángulo incidente. Estas rectas son coincidentes con los rayos reflejados, y se usan para determinar qué distancia hay entre ellas y la línea focal. Si denominamos a esta distancia $d_{(i,j)}$ y consideramos que el radio del tubo absorbedor es r, podemos decir que el rayo analizado intercepta con el tubo absorbedor si:

$$d_{(i,j)} \leq r \tag{2}$$

Si se verifica la condición (2), se almacena en una matriz la intercepción, lo que permitirá, una vez analizadas las reflexiones de todos rayos sobre la matriz de datos reales, calcular el índice de intercepción.

Para representar gráficamente los resultados, se ha decidido determinar también un índice de intercepción parcial, que es un porcentaje que no tiene en cuenta la reflexión en todos los puntos de la superficie, si no, para cada punto *(i, j)*, las reflexiones e intercepciones de dicho punto y sus vecinos. En la Figura 9 se representa gráficamente un ejemplo de este índice de intercepción.

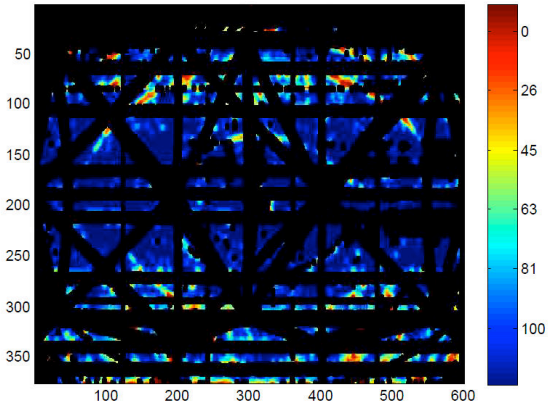


Figura 9: Ejemplo de índice de intercepción local para un colector cilindro-parabólico.

3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El método propuesto ha sido probado usando los datos de tres colectores cilindro-parabólicos instalados en una planta termosolar en funcionamiento. Los espejos escaneados tienen una distancia focal de 1480 mm, una longitud de 8 m y una apertura de 5,5 m. El tubo absorbedor dispone de dos cilindros concéntricos. El exterior es de vidrio y tiene un diámetro de 125 mm y el interior es de acero y tiene un diámetro de 70 mm.

Para la adquisición de los datos se ha empleado un escáner láser de desplazamiento de fase, Faro LS-880. En la tabla 1 se muestran las características técnicas de dicho dispositivo.

Lo algoritmos que desarrollan los métodos de análisis explicados han sido escritos en Matlab® en un computador estándar.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Como se ha dicho, el método ha sido aplicado sobre los datos de tres colectores. En la tabla 2 se muestran los resultados cuantitativos que se han obtenido. La primera, segunda y tercera columna representa, respectivamente, el parámetro calculado, el espejo analizado y el escaneo realizado. En la cuarta columna se muestra el valor medio calculado para cada parámetro. Por último, en la quinta y sexta columna se muestran, respectivamente, el valor máximo y mínimo para cada parámetro. Como se puede ver, los datos obtenidos para cada colector con cada escaneo, son similares, lo que corrobora el análisis propuesto en este trabajo.

Tabla 1: características técnicas del Faro LS-880

Rango	Hasta 80 m
Intervalo de no ambigüedad	76.7 m
Error lineal a 25m y con 84% de reflectividad	3 mm
Resolución típica (pixel)	8000 × 3500
Max. Resolución (pixel)	470000 × 16384
Campo de visión horizontal	360°
Campo de visión vertical	320°
Max. Resolución (grados)	0.00076 × 0.01653
Velocidad de captura	120000 pixel/s
Potencia del láser	20.0 mW
Longitud de onda	785 nm
Peso	14.5 kg

Tabla 2: Resultados de los análisis de los colectores solares.

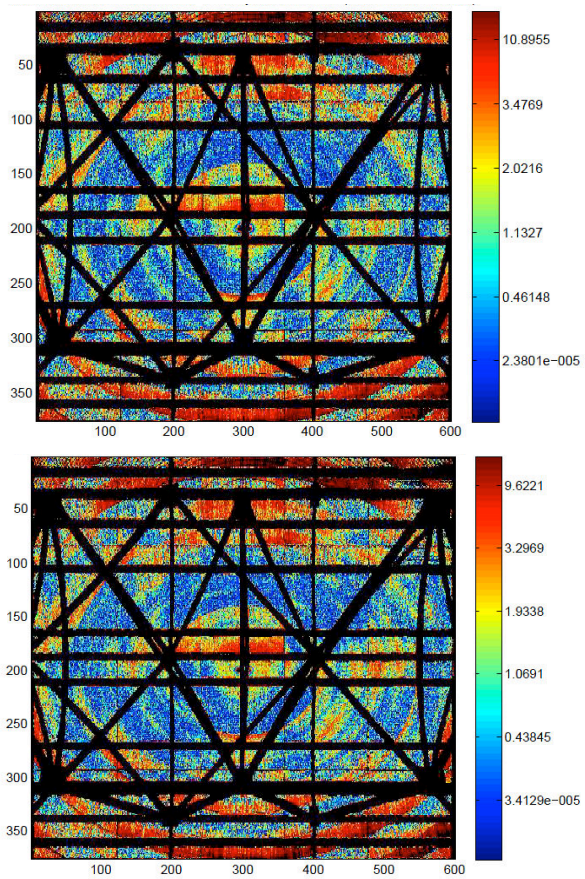
Parámetro	Espejo	Escaneo	Valor Medio	Valor Máx.	Valor Mín.
Distancia entre la superficie real y teórica (mm)	1	1	2.257	10.369	$7.2689 \cdot 10^{-7}$
	2	1	3.509	11.411	$1.2555 \cdot 10^{-5}$
		2	3.110	12.989	$8.5040 \cdot 10^{-6}$
	3	1	2.169	10.895	$2.3801 \cdot 10^{-5}$
		2	2.036	9.622	$3.4129 \cdot 10^{-5}$
Distancia entre el foco real y teórico (mm)	1	1	4.306	17.868	0.0010
	2	1	6.305	20.697	0.0020
		2	6.385	29.382	0.0025
	3	1	7.910	24.996	0.1193
		2	7.834	16.308	0.0250
Ángulo entre el vector normal de la superficie real y teórica (º)	1	1	0.0747	0.1518	0.0267
	2	1	0.077	0.1563	0.0311
		2	0.080	0.1719	0.0280
	3	1	0.069	0.1469	0.0261
		2	0.068	0.1445	0.0256
Desviación del punto de intersección de los rayos en el tubo absorbedor	1	1	39.091	336.80	0.0013
	2	1	29.716	378.29	0.0012
		2	30.186	358.99	$9.8311 \cdot 10^{-4}$
	3	1	26.647	264.28	$4.5251 \cdot 10^{-4}$
		2	26.241	309.26	$8.1261 \cdot 10^{-4}$

En la tabla 3 se proporcionan los índices de intercepción calculados para los distintos colectores. Al igual que antes se puede observar que los resultados son similares en todos los casos.

La similitud de los resultados puede observarse también en las distintas imágenes, representadas en pseudo-color, que se han ido obteniendo. Como ejemplo, en la Figura 10 se muestra en (a) las distancias entre la superficie real y teórica y en (b) la línea focal real y teórica. En ambos casos los resultados se han obtenido para dos escaneos distintos de un mismo espejo.

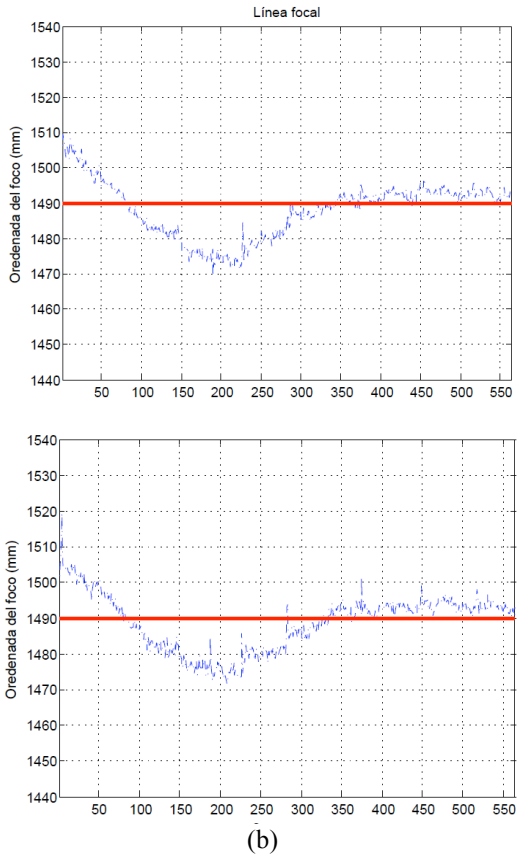
Tabla 3: Índices de intercepción

Parámetro	Espejo	Escaneo	Tubo interior	Tubo exterior
Índice de intercepción (%)	1	1	64.3289	86.4381
	2	1	63.6049	86.8411
		2	60.3522	83.2126
	3	1	67.0108	86.9768
		2	67.2918	87.5450



(a)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(b)

Figura 10: Imágenes que representan (a) la distancia entre la superficie real y teórica; y (b) la línea focal real y teórica en un colector para dos escaneos distintos. Se observa la similitud entre los resultados.

4 CONCLUSIONES

Los escáneres 3D son dispositivos cuya precisión, maniobrabilidad, facilidad de uso y velocidad, los convierten en herramientas ideales para la caracterización de colectores solares. Además, sus características posibilitan escanear espejos que están instalados en las plantas termosolares, a diferencia de otros sistemas de adquisición que sólo pueden ser utilizados en la fase de desarrollo de los colectores y no en la fase de explotación.

En este trabajo se ha propuesto un marco de trabajo para determinar distintos parámetros geométricos y energéticos que permite hacer un análisis del rendimiento de los colectores solares. Estos parámetros son la diferencias entre las superficies reales y teóricas (o ideales), la distancia entre la línea focal real e ideal y el índice de intercepción.

Los resultados experimentales, calculados sobre distintos espejos, de los que se han realizado varias adquisiciones, demuestran la validez del método, ya que se obtienen valores similares en todos los casos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto de la CICYT DPI2013-43344-R cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Fondo Social Europeo; y el proyecto GR10157 cofinanciado por la Junta de Extremadura y el Fondo Social Europeo.

Referencias

[1] Paul Breeze (2005) Power Generation Technologies, Elsevier Ltd. 2005.

[2] K. Pottler, E. Lüpfert, G. Johnston, M. Shortis, (2005) "Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components", *J. Sol. En. Eng*. Vol. 127, pp. 94-101.

[3] S.A. Jones (1999) "VSHOT Measurements of DISTAL II Dish Concentrators*", Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century*, a joint ASME/JSME/JSES/KSME International Conference, Hawaii.

[4] S. Kammel; F. P. Leon, (2005) "Deflectometric Measurement of Specular Surfaces," *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, IMTC 2005., vol.1, no., pp.531-536.

[5] T Wendelin, K May, R Gee (2006) "Video Scanning Hartmann Optical Testing of state-of-the-art parabolic trough concentrators", *Int. Solar Energy Congress* 2006, p. 699–708.

[6] Besl, P. J., & McKay, H. D. (1992) "A method for registration of 3-D shapes" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239–256.

[7] Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001) "Efficient variants of the ICP algorithm" *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145–152.

[8] Campbell, R. J., & Flynn, P. J. (2001) "A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques", *Computer Vision and Image Understanding*, 81(2), pp. 166–210.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Implementación de controladores PID: Equivalencia y Optimalidad

Helem Sabina Sánchez*, Ramon Vilanova*, Orlando Arrieta†
* Departament de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes,
Universitat Autónoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, España
{helemsabina.sanchez, ramon.vilanova}@uab.cat
†Departamento de Automática,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
orlando.arrieta@ucr.ac.cr

Resumen

Utilizaremos una técnica de optimización multiobjetivo, el NNC (Normalized Normal Constraint) para realizar una comparación entre las diferentes configuraciones de un controlador PID (proporcional-integral-derivativo), en las que se puedan observar como varía el espacio de objetivos y como se ve afectado a medida que el tiempo normalizado aumenta. Además se emplearan las ecuaciones de conversión para pasar de una configuración mas general como lo es el controlador PID ideal con filtro a una configuración serie, siendo esta la mas restrictiva.

Palabras clave:controladores PID, frentes de pareto, solución de Nash.

1. Introducción

Los controladores PID siguen siendo una solución robusta, práctica y fiable para el control de procesos industriales, donde casi el 95 % de los lazos de control utilizadas son PID. El nombre que se utiliza para identificar el tipo de controlador, generalmente está relacionado con los modos de control que lo forman: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D); las cuales se refieren a las acciones de control tomados usualmente sobre el error.

A lo largo del tiempo se ha podido observar la evolución de los controladores industriales. El primer controlador de neumático [1] puramente proporcional fue el Taylor Modelo 10R en 1930. Después en 1934 Foxboro introdujo el proporcional-integral (Modelo 40), y en 1938 Taylor incorporó el modelo derivativo en su Modelo 56R creando así el proporcional-derivativo.

Finalmente en 1940, fue puesto en el mercado a través de Taylor Instruments el primer PID industrial (Fullscope 100) [2] que incorporaba las tres acciones básicas de control antes mencionados. Debido a la forma en la que este controlador fue realizado y la ecuación utilizada para la descripción de las acciones del controlador PID, se originaron múltiples y diversas formas para referirse a él.

En la literatura nos encontramos con diversos nombres: controlador PID, estándar, ideal, industrial, paralelo, PI-D, I-PD, de un grado de libertad, dos grados de libertad, interactuante, no interactuante, clásico, de ganancias independientes , estándar, ISA, tipo A, B, C o D y mezclas de los mismos para describir esta clase de controladores [3]. En cuanto a la denominación de cada acción de control, también hay una variedad de términos y unidades en función de las preferencias de sus fabricantes [4, 5].

Se ha mencionado en otras partes [6, 7] algunas de las características deseables que un controlador PID moderno debe tener. Por lo tanto, se considera conveniente y también necesario, tener las ecuaciones que permiten describir la operación de las diferentes variables de los controladores PID disponibles comercialmente. Por lo general, la aplicación del algoritmo de control depende del fabricante y algunas veces sus variaciones no están disponibles en el mismo controlador. Además, se puede dar el caso de que una regla de sintonía de interés se haya obtenido sobre la base de un algoritmo de control diferente a la implementada en el controlador a sintonizar. En este caso, se requiere la conversión de los parámetros del controlador, que también indicará si existe el controlador equivalente deseado.

Se emplean las ecuaciones de 2GdL para algoritmos de control PID Estándar, Paralelo, Serie e Ideal con filtro [8]. El PID Ideal con filtro es el algoritmo de control más general seguido por el PID Estándar y Paralelo siendo el PID Serie el más restrictivo.

En este trabajo, se aplico la optimización multiobjetivo a la configuracion Ideal con filtro, luego se aplicaron las formulas de conversión para observar su equivalencia en las configuraciones antes mencionadas, además se analizará como varía el comportamientos de los índices de rendimiento y robustez a medida que el τ_0 aumente. El resto del artículo se organiza de la siguiente forma: La sección 2 presenta el sistema de control; mientras que en la Sección 3 los algoritmos de control PID 2GdL; luego en la Sección 4 se describe brevemente algunas ideas y conceptos relacionados con la optimización multi-objetivo; en la Sección 5 se presentara un análisis y comparación de las configuraciones PID, para finalmente presentar las conclusiones y reflexiones de este trabajo.

2. Sistema de Control

Considere el sistema de control en lazo cerrado (Figura 1), donde $P(s)$ y $C(s)$ son el modelo del proceso controlado y la función de transferencia del controlador, respectivamente. En este sistema, $r(s)$ es la refe-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

rencia, $u(s)$ es la señal de salida del controlador, $d(s)$ la perturbación al sistema, $y(s)$ es la salida del proceso, $n(s)$ es la medición de ruido y $y'(s)$ es la señal de realimentación contaminada con el ruido.

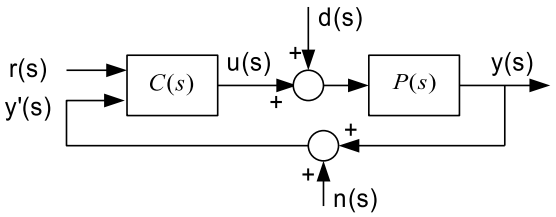


Figura 1: Sistema de Control en Lazo Cerrado

En general, para controladores de dos grados de libertad (2GdL) su señal de salida, se puede expresar como:

$$u(s) = C_r(s)r(s) - C_y(s)y(s), \tag{1}$$

donde $C_r(s)$ es la función de transferencia del controlador desde la referencia y $C_y(s)$ es la función de transferencia del controlador realimentado. La señal de salida del sistema de control $y(s)$, a un cambio en sus entradas, $r(s)$ y $d(s)$, está dada por:

$$y(s) = M_{yr}(s)r(s) + M_{yd}(s)d(s), \tag{2}$$

donde

$$M_{yr}(s) = \frac{C_r(s)P(s)}{1 + C_y(s)P(s)}, \tag{3}$$

es la función de transferencia desde la referencia a la salida del proceso.

$$M_{yd}(s) = \frac{P(s)}{1 + C_y(s)P(s)}, \tag{4}$$

es la función de transferencia desde la perturbación del sistema a la salida del proceso, las cuales están relacionadas por:

$$M_{yr}(s) = C_r(s)M_{yd}(s). \tag{5}$$

3. Algoritmos de Control PID 2GdL

Aunque todos los controladores proporcional-integral (PI) se aplican de la misma forma, tienen la misma función de transferencia, este no es el caso con los controladores comerciales proporcional-integral-derivativo (PID). Además, los fabricantes utilizan diferentes nombres para el mismo controlador PID [9]. La diversidad de los algoritmos de control PID es evidente veáse [10].
Los algoritmos de control PID más utilizados se describen brevemente a continuación. Para más detalles acerca de las ecuaciones ver [8].

3.1. PID Estándar 2GdL

La salida de un controlador estándar esta dada por:

$$\begin{aligned} u(s) =& K_p\left(\beta + \frac{1}{T_i s}\right) r(s) \\ & - K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1}\right) y(s), \end{aligned} \tag{6}$$

parámetros: $\theta_c = \{K_p, T_i, T_d, \alpha, \beta, \gamma = 0\}$.

La formulación Estándar (PID_2) es una implementación clásica dentro de los algoritmos de control; las siguientes configuraciones también son encontradas en la literatura [5, 11, 12]:

3.2. PID Paralelo 2GdL

En un PID paralelo, cada modo tiene un ajuste de ganancia independiente. La salida del controlador se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} u(s) =& \left(\beta_p K_p + \frac{K_i}{s}\right) r(s) \\ & - \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\alpha_p K_d s + 1}\right) y(s). \end{aligned} \tag{7}$$

Para pasar de PID Estándar 2GdL a un PID Paralelo 2GdL, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$K_p = K_p, \tag{8}$$
$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, \tag{9}$$
$$K_d = T_d K_p, \tag{10}$$
$$\alpha_p = \frac{\alpha}{K_p}, \tag{11}$$
$$\beta_p = \beta, \tag{12}$$
$$\gamma_p = \gamma = 0. \tag{13}$$

parámetros: $\theta'_c = \{K_p, K_i, K_d, \alpha_p, \beta_p, \gamma_p = 0\}$

3.3. PID Serie 2GdL

Al PID Serie se le conoce como “interactuante”, el cual es el resultado de formar un PID utilizando un PI en serie con un PD. Su ecuación de salida esta dada por:

$$\begin{aligned} u(s) =& K'_p\left(\beta' + \frac{1}{T'_i s}\right) r(s) \\ & - K'_p\left(1 + \frac{1}{T'_i s}\right)\left(\frac{T'_d s + 1}{\alpha' T'_d s + 1}\right) y(s). \end{aligned} \tag{14}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Para pasar de un PID Estándar 2GdL a un PID Serie 2GdL:

$$K'_p = F_c K_p, \tag{15}$$
$$T'_i = F_c T_i, \tag{16}$$
$$T'_d = \frac{(1+\alpha)T_d}{F_c} \tag{17}$$
$$\alpha = \frac{F_c \alpha}{1+\alpha}, \tag{18}$$
$$\beta' = \frac{\beta}{F_c}, \tag{19}$$
$$\gamma' = \gamma = 0, \tag{20}$$
$$F_c = 0{,}5\left[1 + \frac{\alpha T_d}{T_i} + \sqrt{1 - \frac{(4+2\alpha)T_d}{T_i} + \frac{\alpha^2 T_d^2}{T_i^2}}\right] \tag{21}$$

parámetros: $\theta'_c = \left\{K'_p, T'_i, T'_d, \alpha', \beta', \gamma' = 0\right\}$

3.4. PID Ideal con filtro 2GdL

Al controlador ideal se le dice "no interactuante.[en] el dominio del tiempo, ya que cada uno de los modos de control se encuentran separados, a pesar de que en el dominio de la frecuencia, la ubicación de los dos ceros del controlador se ve afectados por Ti como por Td.
Una implementación comúnmente de PID basada en un Modelo de Control Interno está dada por:

$$u(s) = K_p^*\left(\beta^* + \frac{1}{T_i^* s}\right) r(s) - K_p^*\left(1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s\right)\left(\frac{1}{T_f s + 1}\right) y(s). \tag{22}$$

parámetros: $\theta_c^* = \left\{K_p^*, T_i^*, T_d^*, T_f, \beta^*, \gamma^* = 0\right\}$

El PID Ideal con filtro (22), denotado como PID_{2F} es el algoritmo de control más general. Para pasar de PID Estándar 2GdL a un PID_{2F}:

$$K_p^* = F_{cf} K_p, \tag{23}$$
$$T_i^* = F_{cf} T_i, \tag{24}$$
$$T_d^* = \left(\frac{1+\alpha}{F_{cf}}\right) T_d, \tag{25}$$
$$T_f = \alpha T_d \tag{26}$$
$$\beta^* = \frac{\beta}{F_{cf}}, \tag{27}$$
$$\gamma^* = 0, \tag{28}$$
$$F_{cf} = 1 + \frac{\alpha T_d}{T_i}. \tag{29}$$

F_{cf} (29) es el factor de conversión para pasar PID_2 *a* PID_{2F}. En la figura 2, se muestra el proceso de conversión para PID 2GdL. Las flechas continuas indican direcciones en donde siempre hay un controlador equivalente y las flechas discontinuas muestran las direcciones en donde hay restricciones para obtener los controladores equivalentes.

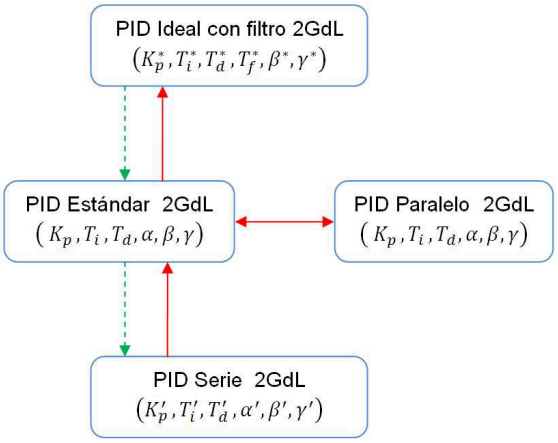


Figura 2: Diagrama de Conversión para PID 2GdL.

4. Optimización Multiobjetivo

El problema de optimización multi-objectivo (MOP) consiste en minimizar *m* objetivos, todos ellos de igual importancia para el diseñador. Esto implica la existencia de un conjunto de soluciones, donde todas son óptimas y diferentes entre sí, solo por el grado de compromiso en el espacio de objetivos [13]. Este conjunto de soluciones se conoce como el conjunto de Pareto $\boldsymbol{\Theta_P}$ y su imagen en el espacio de objetivos como **frente de Pareto** $\boldsymbol{J_P}$. Donde cada solución en el frente de Pareto es una solución no-dominada y pareto-óptima. Con tal conjunto de soluciones, es posible apreciar el intercambio de prestaciones, y es posible lograr un mayor involucramiento del diseñador en la selección final de la solución [14] acorde con sus preferencias. Por tanto, una fase final de toma de decisiones y selección multicriterio (MCDM) es llevada a cabo, para seleccionar la solución final que se va a implementar. Un MOP sin pérdida de generalidad (un problema de maximización puede ser traducido un problema de minimización), se puede plantear de la siguiente forma:

$$\min_{\boldsymbol{\theta}\in\Re^n} \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}) \quad = \quad [J_1(\boldsymbol{\theta}), \ldots, J_m(\boldsymbol{\theta})] \in \Re^m \tag{30}$$

Al plantear un problema de optimización multiobjetivo, no se obtiene una única solución, sino un conjunto de soluciones potenciales, describiendo diferentes grados de compromiso entre los objetivos.
Las técnicas MO buscan una discreta aproximación $\boldsymbol{\Theta_P^*}$ del conjunto de Pareto $\boldsymbol{\Theta_P}$ capaz de generar una buena representación del frente de Pareto $\boldsymbol{J_P^*}$. De esta manera, la toma de decisiones (o el diseñador) pueden analizar el conjunto y seleccionar la solución más preferible.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Por tanto, el uso de MOO para el diseño debe considerar de forma integral al menos, al MOP y la etapa MCDM. Todo este proceso puede ser definido como un diseño por medio de optimización multi-objetivo (MOOD) el cual consiste en tres aspectos [15]: la definición de un problema multi-objetivo, la optimización simultánea de todos los objetivos para obtener un conjunto de soluciones Pareto-óptimas y finalmente un proceso de selección y toma de decisiones multicriterio para seleccionar la solución que se implementará.

4.1. Problema de Optimización Multiobjetivo

Los requerimientos a menudo incluyen especificaciones en la atenuación de la perturbación, la medición del ruido y la robustez para procesar la incertidumbre. La representación de objetivos para el ajuste de PID pueden ser representados como:

$$\begin{aligned} \text{mín}\, \boldsymbol{J}(k_p, T_i) &= [J_1(k_p, T_i), J_2(k_p, T_i)] \quad (31) \\ J_1(k_p, T_i) &= Rendimiento(k_p, T_i) \quad (32) \\ J_2(k_p, T_i) &= Robustez(k_p, T_i) \quad (33) \end{aligned}$$

El rendimiento de control $J_1(k_p, Ti)$ se caracteriza usualmente por la integral del error absoluto

$$J_{IAE} = \int_0^\infty e(t)dt \quad (34)$$

donde e es el error del sistema cuando se encuentra con una perturbación en forma de escalón unitario. Este es reconocido como una buena medida de rendimiento para sistemas de control con acción integral.
La evaluación de las variaciones del esfuerzo de control, se puede realizar mediante un índice de su variación total $J_2(k_p, T_i)$, definido por:

$$TV_u = \sum_{k=1}^{\infty} u(k+1) - u(k) \quad (35)$$

En [16] se realizaron experimentos que mostraron una correlación entre los valores de robustez M_s y el esfuerzo de control TV. Por consiguiente podemos asociar directamente la (36) al TV y pensar en este índice no sólo como uso de entrada. Sino también como una medida de la robustez del sistema.

$$M_s = \max_w \left| \frac{1}{1 + C_y(jw)P(jw)} \right| \quad (36)$$

donde C_y es la función de transferencia del controlador realimentado, P es el proceso controlado definido en la ecuación (37).

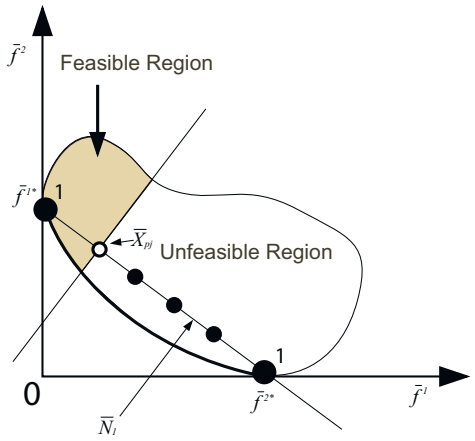


Figura 3: NNC para un caso de bi-objetivos.

4.2. Normal Normalized Constraint

Al utilizar este método [1], el problema de optimización se separa en varios problemas de optimización individuales con su respectiva restricción. Después de una serie de optimizaciones, se obtiene un conjunto de soluciones distribuidas uniformemente sobre el frente de Pareto. El método NNC incorpora una aplicación crítica de asignación lineal en los objetivos de diseño. Esta asignación tiene como propiedad deseable que el rendimiento resultante del método sea completamente independiente de las escalas de los objetivos de diseño y tiene la capacidad de generar un buena distribución de soluciones en el espacio de objetivos e incluso en situaciones exigentes numéricamente. El método NNC se presenta aquí para resolver un problema bi-objetivos, pero puede ser generalizado a *n*-objetivos, para más detalles sobre el método [17].

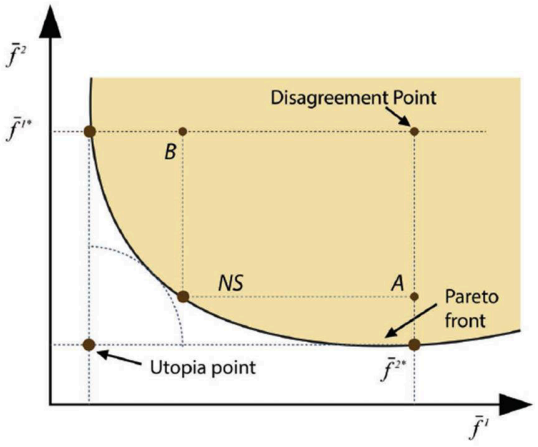


Figura 4: La solución de Nash.

[1] El algoritmo esta disponible en Matlab Central en `http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38976`

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4.3. Solución de Nash

Aquí se propone utilizar la solución de Nash (*NS*) como criterio de selección ver figura 4. Para explicar esta opción ,se introduce lo que se puede llamar el punto de desacuerdo. Si pensamos en los dos objetivos de forma independiente, ninguno de los dos estaría de acuerdo en este punto como una solución común, ya que representa la peor situación. El área del rectángulo definido por los puntos (NS, A, B) y el punto de desacuerdo proporciona una medida de la cantidad de soluciones que el punto NS mejora en ambos objetivos al mismo tiempo. Por lo tanto, vamos a elegir la solución de Nash que es la que maximiza dicha zona. La denominación proviene de la identificación de este punto como solución de *Nash* que es un juego de negociación entre ambos objetivos [18]. Este enfoque proporciona una forma simple y directa para seleccionar un punto dentro del frente de Pareto [19].

5. Análisis

Con el fin de comparar los algoritmos de control PID, el proceso controlado se representa por una función de transferencia de la forma:

$$P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{(Ts+1)} \tag{37}$$

donde *K* es la ganancia, *T* es la constante de tiempo, y *L* es el tiempo muerto. El tiempo muerto normalizado es definido por $\tau_0 = \frac{L}{T}$.
En esta sección se aplican las fórmulas de conversión a la configuraciones Ideal con filtro, las cuales han sido obtenidas a través de la optmización multi-objetivo.

5.1. Discusiones e Ideas

La optimización multi-objetivo se aplicó a la configuración más general ($PID_(2F)$), se calcularon los frentes de Pareto para tiempos muertos normalizados a partir de 0.1 a 2.0. Pero en este trabajo solamente se presentarán 3 casos representativos (0.6,1.0 y 2.0).

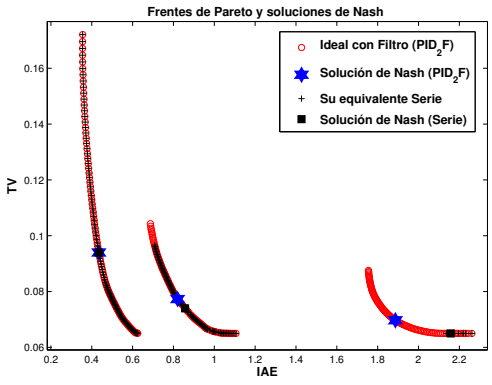


Figura 5: Frentes de Pareto y soluciones de Nash

Se puede observar en los frentes de Pareto que se muestran en la Figura 5, que a medida que el τ_0 aumenta, el índice de rendimiento (IAE) también lo hace.
Por otro lado el esfuerzo de control (TV) va disminuyendo al mismo tiempo que la robustez del sistema es mayor. Esto se puede ver claramente en las Tablas 1 y 2, en donde se muestran los valores de rendimiento y de robustez para las diferentes configuraciones y cada caso específico de τ_0. Además en la Figura 5, se presenta el equivalente serie para el PID_2F y PID_2. Es importante mencionar que al pasar de la configuración PID_2F a la PID_2 todas las soluciones tuvieron su equivalente, por lo cual estas dos configuraciones tienen la misma solución de Nash. En la Figura 6 podemos apreciar que las soluciones equivalentes series son cada vez menos a medida que τ_0 aumenta. Por consiguiente la soluciones de Nash ya no sería la misma para el caso del PID Serie como se muestra en la Tabla 2.

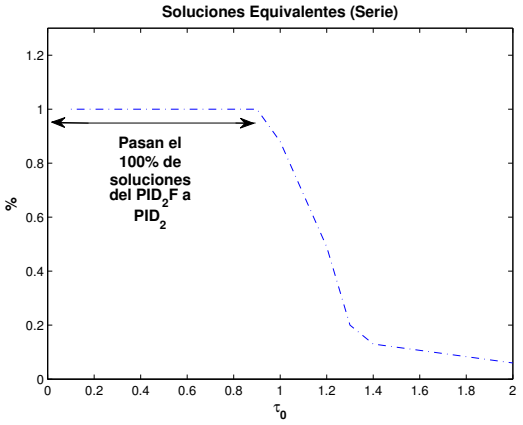


Figura 6: Soluciones Equivalentes que pasan de $PID_(2F)$ a un PID Serie.

Cuadro 1: Rendimiento y Robustez (PID_2F y PID_2).

τ_0	IAE	TV	M_s
0.6	0.4348	0.0940	1.69
1.0	0.8571	0.0740	1.51
2.0	2.1583	0.0650	1.42

6. Conclusiones

En este trabajo fueron analizadas las configuraciones de control para PID, para diferentes valores de τ_0 (0.1 a 2.0). Se observo que la configuración Ideal con filtro tiene su equivalencia Estándar en todos los tiempos muertos normalizados empleados. En cambio al buscar su equivalente Serie, mientras τ_0 fuese menor que 1.0 se llego a obtener una equivalencia total (en el espacio de objetivos), pero cuando τ_0 alcanzo el valor 1.0, las soluciones equivalentes fueron disminuyendo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 2: Rendimiento y Robustez ($Serie$).

τ_0	IAE	TV	M_s
0.6	0.4348	0.0940	1.69
1.0	0.8206	0.0773	1.53
2.0	1.8869	0.0697	1.48

a medida que τ_0 iba aumentando. Por otro lado se observo como el IAE se hace cada vez mas grande, mientras tanto el TV disminuye y la robustez del sistema es mayor.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido el apoyo financiero del programa CICYT español bajo la subvención DPI 2013-47825-C3-1-R.

Referencias

[1] M. Babb, "Pneumatic Instruments Gave Birth to Automatic Control," *Control Engineering*, vol. 37, no. 12, pp. 20–26, 1990.

[2] S. Bennett, "The Past of PID Controllers," in *IFAC Digital Control: Past, Present and Future of PID Control*, April 2000, Terrassa, Spain.

[3] V. M. Alfaro, "Ecuaciones para controladores PID universales," *Revista Ingeniería*, vol. 12, no. 1-2, 2002.

[4] V. Alfaro, "¿Son todos los controladores pid iguales?" *Revista Ingeniería*, vol. 3, no. 1, 2011.

[5] A. Visioli, *Practical PID Control.* Springer Verlag Advances in Industrial Control Series, 2006.

[6] InTech, "Control engineering: .ªutomatic controller dynamic specification"," *Summary Version 1.0*, 1993.

[7] J. Gerry and F. Shinskey, "PID controller specification (White Paper)," *ExperTune Inc.*, 2000.

[8] V. M. Alfaro and R. Vilanova, "Conversion formulae and performance capabilities of two-degree-of-freedom pid control algorithms," in *Proceedings of the 17th. IEEE Conference on emerging technologies & factory automation (ETFA)*, 2012.

[9] J. Gerry, "A comparison of PID control algorithms," *Control Engineering (EUA)*, vol. 34 (3), no. 3, pp. 102–105, 1987.

[10] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, 2nd ed. Imperial College Press, London, UK, 2006.

[11] M. A. Johnson, *PID Control - New Identification and Design Methods*. Springer-Verlag London Ltd., U.K., 2005, ch. PID Control Technology, pp. 1–46.

[12] S. W. Sung and I.-B. Lee, *Process Identification and PID Control*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2009.

[13] K. M. Miettinen, *Nonlinear multiobjective optimization*. Kluwer Academic Publishers, 1998.

[14] P. P. Bonissone, R. Subbu, and J. Lizzi, "Multicriteria decision making (MCDM): a framework for research and applications," *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, vol. 4, no. 3, pp. 48–61, 2009.

[15] G. Reynoso-Meza, J. Sanchis, X. Blasco, and M. Martínez, "Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: current trends and applications," *Control Engineering Practice*, no. DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.03.003, 2014.

[16] H. Sánchez and R. Vilanova, "Multiobjective tuning of PI controller using the NNC method: Simplified problem definition and guidelines for decision making," in *Proceedings of the 18th. IEEE Conference on emerging technologies & factory automation (ETFA)*, 2013.

[17] A. Messac, A. Ismail-Yahaya, and C. Mattson, "The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, no. 25, pp. 86 – 98, 2003.

[18] R. Aumann and S. Hart, *Handbook of Game Theory with Economic Applications*. Elsevier, 1994.

[19] H. Sánchez and R. Vilanova, "Nash-based criteria for selection of pareto optimal controller," in *Proceedings of the 17th. International Conference on System Theory, Control anmd Computing.*, 2013.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

MÉTODO DE LOCALIZACIÓN PRECISA DE PUPILAS EN IMÁGENES A COLOR

J. Enrique Sierra
Universidad de Burgos, jesierra@ubu.es

Matilde Santos
Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

La posición de las pupilas es un elemento que puede facilitar la reducción de los accidentes de tráfico. Por lo tanto, desarrollar un método o para su localización es de vital importancia. En esta contribución se presenta un método para la localización precisa de pupilas. La propuesta se basa en las siguientes características: asegura una luminosidad homogénea, detecta el rostro mediante mapa de color, y prioriza una zona de búsqueda empleando algoritmos de umbralización, segmentación y operaciones morfológicas. La parte de la imagen que corresponde a los ojos se selecciona basándose en propiedades antropométricas y, dentro de ella, las pupilas se localizan empleando criterios de distribución de luminosidad. Se muestran resultados de la aplicación del método en diferentes imágenes con resultados satisfactorios.

Palabras Clave: detección, localización, imágenes a color, operaciones morfológicas, pupilas.

1 INTRODUCCIÓN

La posición de las pupilas es un elemento que puede facilitar la reducción de los accidentes de tráfico dadas las nuevas facilidades de los sensores. Su localización proporciona una información vital acerca del nivel de atención del conductor respecto a los estímulos que recibe durante la conducción. Por un lado informa del campo de visión actual. Si este campo de visión que se abarca no es el adecuado no se podrán percibir los estímulos necesarios para una conducción segura. Por otro lado, el movimiento de las pupilas informa del nivel de consciencia del conductor, de su estado anímico, e incluso de su nivel de cansancio. Por tanto, desarrollar un método de localización preciso es una tarea que puede ser muy relevante.

En esta línea, algunos de los métodos propuestos en la literatura se han centrado en la detección de los ojos. Una revisión de estas técnicas puede encontrase en [1]. Los métodos clásicos incluyen: métodos de cruce, autoespacios, o la transformada de Hough [2], [3]. Se han propuesto también otras técnicas, como en [4], donde se usan operaciones morfológicas, y tras un proceso de etiquetado se generan regiones potenciales que se clasifican usando una red neuronal. Ideas similares aparecen en Wu y Zhou [5], y Huynh[6]. Huang y Wechsler [7] emplean algoritmos genéticos para descubrir las localizaciones más probables de los ojos. Kawaguchi y Rizon [8] emplean criterios de luminosidad y bordes para localizar el iris.

Muchos de los métodos propuestos tras localizar el rostro lo dividen en dos zonas: en la superior se busca la localización de los ojos y en la zona inferior la boca. Esta estrategia posee algunas deficiencias: primero, la captura del rostro no siempre se realiza con el mismo encuadre, sobre todo cuando el sujeto está en movimiento. Esto hace que no pueda asegurarse que los ojos aparezcan siempre en una parte de la imagen predefinida. Además el método de detección del rostro no suele ser completamente fiable, y algunas veces aparecen sombras que hacen que una parte de la cara no se reconozca y en este caso, las zonas prefijadas tampoco funcionarían. Para resolver esta dificultad en este trabajo se propone un método de selección de una franja donde se maximiza la probabilidad de encontrar los ojos. Esta zona se emplea después para focalizar la búsqueda de los ojos y posteriormente la localización de las pupilas.

Otra de las razones para diseñar este algoritmo ha sido que no es preciso entrenar el sistema como un clasificador de caras. Algunos detectores de rostros necesitan ser entrenados durante horas o incluso días para alcanzar un comportamiento satisfactorio. Además los resultados son demasiado sensibles al conjunto de datos empleado para el entrenamiento. En el método aquí propuesto se combinan diferentes algoritmos como el mapa de colores, las propiedades antropométricas o la luminosidad en las pupilas junto con el método de selección de zona ya comentado, lo que lo hace más robusto.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

La organización del artículo es la siguiente. En la sección 2 se describe el método propuesto paso a paso, tanto la fase de corrección de luminosidad como el algoritmo de detección de rostro. En este mismo apartado se detalla el proceso seguido para la selección de la zona y la búsqueda de los ojos. Por último se explica el método para localizar con precisión las pupilas. Algunos de los resultados obtenidos al aplicar el método a diferentes imágenes se presentan en la sección 3. El documento termina con las conclusiones.

2 MÉTODO PROPUESTO

El método propuesto se basa en la aplicación secuencial de un conjunto de operaciones y algoritmos. Primero se busca la corrección de la luminosidad, para asegurar que todas las imágenes tienen unas condiciones homogéneas respecto a esta característica. Después se localiza la cara en la imagen empleando un método basado en los mapas de colores del rostro humano. Una vez detectado se selecciona la zona con mayor probabilidad de albergar los ojos, empleando para ello algoritmos de umbralización, segmentación y procesado morfológico. En la zona seleccionada se buscan los ojos teniendo en cuenta algunas propiedades antropométricas estándar en los seres humanos. Una vez encontrados los ojos, se localizan las pupilas teniendo en cuenta el criterio de que en las pupilas la luminosidad es máxima. Por lo tanto el método se basa fundamentalmente en la característica de la luminosidad.

2.1 CORRECCIÓN DE LUMINOSIDAD

Uno de los problemas fundamentales en el reconocimiento de rostros y, en general, en el reconocimiento de patrones, es que las imágenes se capturan bajo diferentes condiciones de luminosidad. Conviene por tanto procesar la imagen para alcanzar unas condiciones de luminosidad uniformes. Para lograrlo se han estudiado diferentes algoritmos de corrección, y en este estudio se ha seleccionado el definido en [9] y [10], dado por las siguientes expresiones:

$$K_{a_C} = \frac{\sum_{i=1}^{N} pC_i}{\sum_{i=1}^{N} 1_{(pC_i>0)}}, C = \{R, G, B\} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\max(R_i,G_i,B_i)+\min(R_i,G_i,B_i))}{2\sum_{i=1}^{N} 1_{(pR_i>0 \,\&\, pG_i>0 \,\&\, pB_i>0)}} \quad (2)$$

$$S_C = \frac{K_s}{K_{a_C}}, C=\{R, G, B\} \quad (3)$$

Donde N es el número de pixeles de la imagen, pC_i es el valor del pixel i del canal C (R, G; o B), con lo que el denominador de (1) indica el número de pixeles cuyo valor en el canal C es mayor que 0. K_{a_C} es el valor medio de los pixeles distintos de cero del canal C; K_s es el valor de gris medio estándar, y S_C corresponde al factor de corrección para el canal C. El valor de los pixeles en el canal C se debe multiplicar por S_C. En las figuras 1 y 2 se muestran los resultados de aplicar esta homogenización de la luminosidad.

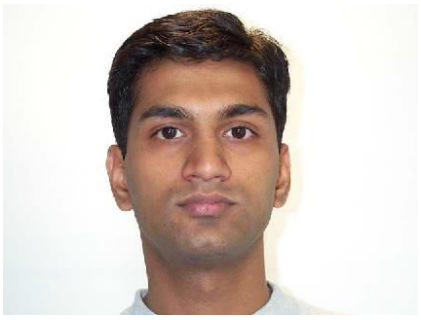


Fig. 1: Imagen inicial.

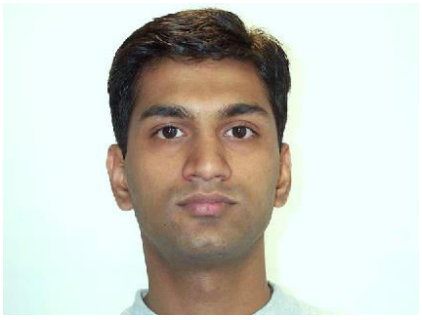


Fig. 2: Imagen tras la corrección de luminosidad.

2.2 DETECCIÓN DEL ROSTRO

El color de la piel humana es una característica muy útil para la detección del rostro. Aunque cada persona tiene una tonalidad distinta, varios estudios han demostrado que las principales diferencias radican en la intensidad en vez de en la crominancia. Siguiendo esta estrategia Chai y King [11], diseñaron un mapa de colores de piel con el que obtuvieron un rango de valores de los parámetros Cb y Cr en el espacio de color YCbCr que pueden emplearse para la detección de rostros.

Para ello, inicialmente se convierte la imagen del formato RGB a YCbCr con la expresión (4):

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Una vez en el espacio YCbCr se diseña la máscara $M_r(x,y)$ para la detección del rostro basándonos en la información de crominancia:

$$M_{Cb}(x,y) = \begin{cases} 1 \; si \; 80 \leq Cb(x,y) \leq 120 \\ 0 \; en \; otro \; caso \end{cases} \quad (5)$$

$$M_{Cr}(x,y) = \begin{cases} 1 \; si \; 133 \leq Cr(x,y) \leq 173 \\ 0 \; en \; otro \; caso \end{cases} \quad (6)$$

$$M_r(x,y) = M_{Cb}(x,y) \cdot M_{Cr}(x,y) \quad (7)$$

Realmente los rangos de valores empleados por Chai y King fueron: 110 a 123 para Cb y 136 a 156 para Cr. En este estudio se han modificado ligeramente para obtener mejores resultados en la detección.

Después, a la máscara M_r se le aplica una operación morfológica de apertura (dilatación seguida de erosión) con un elemento estructurante tipo rombo contenido en un cuadrado de 81 pixeles (9x9), para la eliminación de ruido. Para la consideración del tamaño del elemento estructurante se debe tener en cuenta que el tamaño medio de las imágenes escogidas es de 640x480 pixeles. La salida de la apertura se lleva a un proceso de etiquetado y se detecta la región con mayor área. De esta región se obtiene el menor rectángulo que la contenga. Este rectángulo será finalmente la máscara para la detección de rostro.

En las figuras 3 a 5 se muestra (por orden de aparición): la máscara del rostro obtenida tras la aplicación de los rangos de crominancia; la máscara después de la apertura; y el resultado de la aplicación de la máscara rectángulo obtenida a la imagen original.

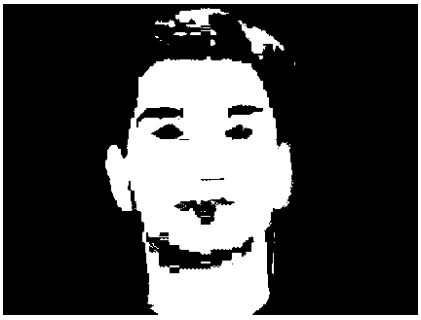


Fig. 3: Mascara tras la aplicación de los rangos de crominancia.

Inicialmente se pensaba utilizar la máscara para detectar los ojos, puesto que como se puede apreciar en la figura 3, los ojos aparecen bien definidos. Pero este método adolecía de varias deficiencias que se hacían palpables en otras imágenes. Por ejemplo: cuando el pelo está situado cerca de los ojos las regiones se solapan y no se puede separar fácilmente el pelo del ojo sin alterar su forma. Otro problema venía provocado por el hecho de que el color de algunos ojos pertenece al rango de colores de piel, provocando la partición de algunos ojos. En general se puede concluir que la forma de la región ocular detectada aplicando solamente la máscara del tono de piel se aleja mucho de una elipse para una gran cantidad de imágenes.

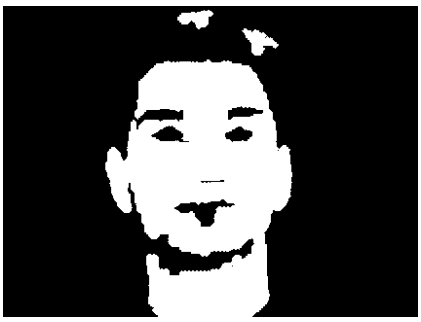


Fig. 4: Mascara después de apertura.

Fig. 5: Rostro detectado.

2.3 SELECCIÓN DE ZONA

Algunos algoritmos de detección de rostros dividen la cara en dos partes, la zona de los ojos y la de la boca. Normalmente se suelen emplear o la mitad superior para ojos y la mitad inferior para boca, o el tercio superior para los ojos y los dos tercios inferiores para la boca. Esta forma de trabajar posee algunas deficiencias: primero, la captura del rostro no siempre se realiza con el mismo encuadre, sobre todo cuando el sujeto está en movimiento, por lo que no puede asegurarse que los ojos siempre aparezcan en una parte de la imagen predefinida. Además el método de detección de rostro no es totalmente fiable; algunas veces se encuentran sombras que hacen que una parte de la cara no se reconozca, por lo que en este caso las zonas prefijadas tampoco funcionarían. Para resolverlo se emplea el método de selección de zona que se describe a continuación.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Se aplica el algoritmo de umbralización de Otsu [12], después de probar diferentes posibilidades el número de clústeres se fijó a 8 obteniendo en este caso los mejores resultados (figura 6). A la imagen resultante se le aplica el filtro de detección de bordes de Canny [13] (figura 7), con lo que se consigue delimitar el contorno de los ojos. Tras este proceso se le aplica una operación morfológica de dilatación con un elemento estructural cuadrado de 9 píxeles (figura 8).

Fig. 6: Imagen tras el algoritmo de Otsu.

Tras la dilatación anterior, se emplea un algoritmo morfológico de puenteo de píxeles desconectados. Este algoritmo funciona de la forma siguiente: cambia el valor de los pixeles nulos a 1, si tienen como vecinos al menos dos pixeles no nulos no conectados entre sí. En nuestro caso el método es útil porque en algunas ocasiones, tras la segmentación, los ojos aparecen divididos en dos o tres regiones; de esta forma se consigue unir estas subregiones

Fig. 7: Imagen tras la aplicación del filtro de Canny.

Fig. 8: Imagen tras la dilatación posterior al Canny

Fig. 9: Imagen tras el rellenado de huecos.

A la imagen resultante se le aplica un algoritmo de rellenado de huecos (Figura 9) rellenando todas las regiones posibles de ojos. Tras este proceso se emplea la siguiente función de acumulado horizontal:

$$F(y) = \sum_{x=1}^{N_x} I(x,y) \quad (8)$$

Donde $I(x,y)$ es el valor del pixel de la coordenada (x,y) de la imagen de entrada, y N_x es el número de pixeles en el eje x. Esta función se caracteriza por tener un máximo absoluto en la región donde se localizan los ojos (figura 10). Por lo tanto puede ser empleada con éxito para esta tarea. Antes de localizar el máximo se suaviza la función con un filtro digital con los siguientes coeficientes: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1]. Una vez localizado el máximo se obtienen los límites superior e inferior con las siguientes expresiones:

$$F_{med} = \frac{1}{N_y}\sum_{y=1}^{N_y} F(y) \quad (9)$$

$$y_m = y|\{F(y) = \max(F(y))\} \quad (10)$$

$$Ys = \{y|(F(y) \leq F_{med}) \wedge (y < y_m)\} \quad (11)$$

$$Yi = \{y|(F(y) \leq F_{med}) \wedge (y > y_m)\} \quad (12)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

$$y_{sup} = \max(y \in Ys) \quad (13)$$

$$y_{inf} = \min(y \in Yi) \quad (14)$$

Donde y_{sup} e y_{inf} son los valores de la coordenada y de los límites superior e inferior, respectivamente, de la franja seleccionada donde se situarán los ojos.

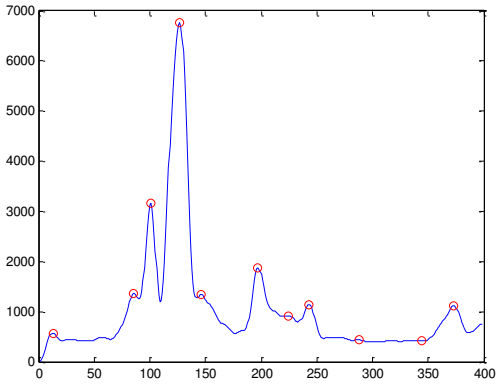


Fig. 10: Función de acumulado horizontal.

Ahora se construye una máscara con la franja delimitada verticalmente por y_{sup} e y_{inf} (figura 11). A continuación, se ejecutará el algoritmo de localización de los ojos en el interior de esta sección.

Fig. 11: Zona seleccionada.

2.4 BÚSQUEDA DE LOS OJOS

La búsqueda de los ojos se realiza a partir de la imagen resultante del algoritmo de rellenado de huecos. En esta imagen se lleva a cabo un proceso de etiquetado detectando las diferentes regiones de interés. A cada una de estas regiones se le considera como un candidato para la selección de cada ojo.

Para el descarte de las regiones se emplean algunas propiedades antropométricas de los ojos conocidas. Sean R_i y R_j dos potenciales regiones descriptoras de ojos. Entonces (R_i, R_j) se considerará un par de ojos si las siguientes condiciones son simultáneamente satisfechas:

$$1 < {}^{a_i}/_{b_i} < 3 \quad (15)$$

$$1 < {}^{a_j}/_{b_j} < 3 \quad (16)$$

$$|\theta_i - \theta_j| < 20° \quad (17)$$

$$\frac{(a_i+a_j)}{2} < d_{ij} < 3\frac{(a_i+a_j)}{2} \quad (18)$$

Donde a_iy a_j son las anchuras de las regiones; b_iy b_j son las alturas de las regiones; θ_i y θ_j son las direcciones de alineamiento de las regiones, y d_{ij} es la distancia entre ellas.

Los parámetros en las ecuaciones (15), (16), y (18) se escogen conforme al hecho de que para los ojos humanos el valor medio de la anchura entre la altura es 2, y el valor medio de la distancia entre el centro de los ojos es el doble de la anchura de un ojo. La ecuación (17) se basa en que los dos ejes principales de los ojos deberían tener la misma orientación.

2.5 LOCALIZACIÓN DE PUPILAS

Una vez seleccionados los ojos con el método anterior se localizan las pupilas en el interior de los ojos. Para ello se emplea un método similar al que se ha usado para la selección con la zona de los ojos. Pero en este caso la función de acumulado es vertical para la localización de la coordenada x, y horizontal para la selección de la coordenada y.

$$F_v(x) = \sum_{y=1}^{O_v(x)} I(x,y) \quad (19)$$

$$F_h(y) = \sum_{x=1}^{O_h(y)} I_Y(x,y) \quad (20)$$

En las expresiones anteriores conviene apreciar que el límite superior del sumatorio es función del valor de la coordenada x para $O_v(x)$, e y para $O_h(y)$. Esto es debido a que en este caso la región no es rectangular sino que tiene la forma del ojo. Además no se aplica a una máscara sino a la componente de luminosidad de la imagen I_Y.

En la figura 12 se muestra la función típica de acumulado vertical de la luminosidad en un ojo. Se pueden apreciar tres máximos locales principales. La posición del máximo local situado entre los otros dos corresponde a la coordenada x de la pupila.

En cambio, la coordenada y de la pupila se encuentra en la posición del máximo absoluto de la función de acumulado horizontal, la cual puede ser observada en el figura 13. En la figura 14 se puede apreciar con una cruz roja la localización de las pupilas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

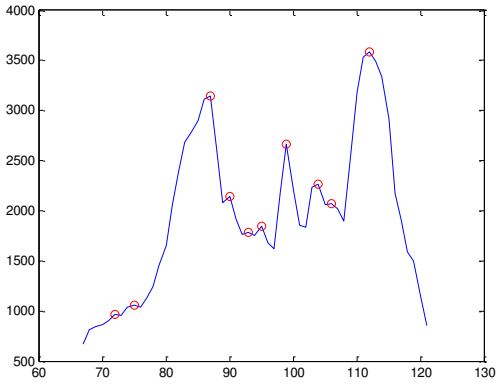


Fig. 12: Función de acumulación vertical de luminosidad en el interior de un ojo.

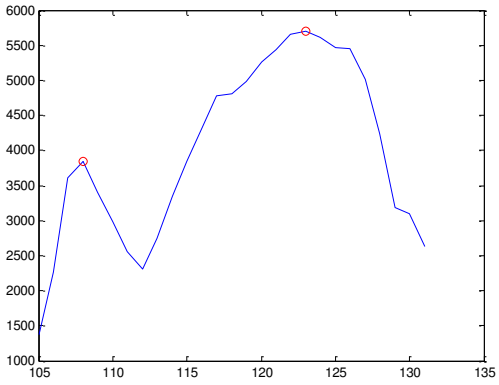


Fig. 13: Función de acumulación horizontal de luminosidad en el interior de un ojo

Fig. 14: Localización de las pupilas

3 RESULTADOS

El método propuesto se ha probado con diferentes imágenes de la base de datos de caras de la Universidad de Dallas [14], y los resultados son satisfactorios. Esta base de datos está formada por imágenes tomadas a personas con edades, tonalidades de piel, y colores de iris diferentes. Las condiciones de luminosidad, sombra y encuadre de las diferentes imágenes no son homogéneas. Si lo es su tamaño, en su mayoría comparten las dimensiones 640x480.

En la figura 15 se presentan algunos resultados de la aplicación del método en imágenes de personas con distintas tonalidades de piel y diferentes condiciones de luminosidad y encuadre.

Fig. 15: Resultados de la aplicación del método en personas con diferentes tonalidades.

El método se ha probado en 100 imágenes detectando correctamente las pupilas en el 63% de los casos.

El algoritmo se ha ejecutado en un procesador i7-4702MQ, obteniendo un tiempo de ejecución de 3 segundos. Este tiempo debe relativizarse puesto que el código no ha sido optimizado. Además se ha implementado en Matlab, si el código se desarrollara en C se obtendrían reducciones significativas del tiempo de ejecución.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un algoritmo para la localización de pupilas. El método asegura una luminosidad homogénea, detecta el rostro mediante mapa de colores YCrCb, prioriza una zona de búsqueda empleando algoritmos de umbralización, segmentación y operaciones morfológicas. Los ojos se seleccionan basándose en propiedades antropométricas y las pupilas se localizan empleando criterios de distribución de luminosidad.

Se han presentado algunos resultados de la aplicación del método a imágenes de personas con distinta tonalidad de piel y diferentes condiciones de luminosidad con resultados satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a los revisores el cuidadoso trabajo que han llevado a cabo que ha servido para mejorar esta contribución.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía y Competitividad con el proyecto DPI2013-46665-C2-1-R.

REFERENCIAS

[1] Song, J. S., Chi, Z., Liu, J., (2006). A robust eye detection method using combined binary edge and intensity information, Pattern Recognition, vol. 39, pp. 1110-1125.

[2] Brunelli, R., and Poggio, T., (1993). Face recognition: features versus templates, IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intel., vol. 15, no. 10, pp. 1042–1052.

[3] Pentland, A., Moghanddam, B., and Starner, T. (1993). View-based and modular eigenspaces for face recognition, in IEEE Proc. of Int. Conf. on CVPR, pp. 84–91, Seattle, Washington.

[4] Han, C.C., Liao, H. Y. M., Yu, G. J. and Chen, L. H., (2000), Fast face detection via morphology based pre-processing, Pattern Recognition, vol. 33, pp. 1701–1712.

[5] Wu, J. and Zhou, Z. H., (2003), Efficient face candidates selector for face detection, Pattern Recognition, vol. 36, pp. 1175–1186.

[6] Huynh, T., (2013), A new eye gaze detection algorithm using PCA features and recurrent neural networks, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, pp. 24–29.

[7] Huang, J. and Wechsler, H., (2000), Visual routines for eye location using learning and evolution, IEEE Trans. on Evol. Comput., vol. 4, no. 1, pp. 73–82.

[8] Kawaguchi, T. and Rizon, M. (2003), Iris detection using intensity and edge information, Pattern Recognition, vol. 36, pp. 549–562.

[9] Md. Hafizur Rahman & Jinia Afrin, (2013), Human Face Detection in Color Images with Complex Background using Triangular Approach, Global Journal of Computer Science and Technology, Volume 13, Issue 4.

[10] Chen, P. and Grecos, C. (2005), A Fast Skin Region Detector, ESC DIVISION RESEARCH Department of EEE, Loughborough University, pp. 35-3.

[11] Douglas Chai D., and King N. Ngan, (1999), Face Segmentation Using Skin-Color Map in Videophone Applications, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY.

[12] Otsu, N., (1979), A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.

[13] Canny, J., (1986), A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, 1986, pp. 679-698.

[14] Minear, M. & Park, D.C.(2004). A lifespan database of adult facial stimuli. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 36, 630-633.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Octree-Based Subsampling Criteria for Bathymetric SLAM*

Albert Palomer[1], Pere Ridao[1], David Ribas[1], Angelos Mallios[1] and Guillem Vallicrosa[1]

Abstract— **This paper addresses the problem of reducing the points used for the registration of submaps (point clouds) for bathymetry-based SLAM while not loosing its more interesting parts (i.e. non-flat areas). The subsampling criteria presented, which can be divided in 3 groups, are evaluated inside each cell of an octree containing the point cloud, if a cell is containing interesting information regarding the subsampling technique, the cell is divided. The first group is based on the distance to a plane, the second one discriminates whether or not a cell is containing information based on the eigenvalues of the Principal Component Analysis (PCA) of the points within the octree cell, and the third is based on comparing the normals of the best fitting plane of the cell and the point cloud one. The different criteria are first evaluated using real data by registering several submaps against themselves since no ground truth is available for real data. Finally the best two criteria of the best two groups are compared using a pose-based EKF-SLAM previously presented.**

I. INTRODUCTION

The concept of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) has spread widely in robotics, focusing most of the research in land mobile platforms [1]. Comparatively, there is still limited research done underwater mostly because of the characteristics of this medium and its environmental complexity.

From the sensors vantage point, we can classify underwater SLAM in two main categories: sonar and vision based SLAM. Although cameras provide a large amount of high-resolution information with fast refresh rate, their use underwater is limited by the visibility conditions of the medium. Recent years have witnessed a number of successful, real world underwater vision implementations of the SLAM problem [2], [3], [4], [5]. In comparison with vision, sonar sensors may work in bad visibility conditions, being able to penetrate deeper ($\sim$150 m) because of the low attenuation of sound in water. However, they provide limited information and medium to low resolution and refresh rate. Although there are still few works in sonar-based underwater SLAM, they are promising.

*This work was supported by the Spanish project DPI2011-27977-C03-02 (COMAROB) and three European Commission's Seventh Framework Program 2011-2015 projects: FP7-ICT-2011-7-288704 (MORPH) and FP7-INFRASTRUCTURES-2012-312762 (EUROFLEETS2). We would like to thank Oscar Pizarro and Stephen Barkby for sharing the dataset and information. Moreover, we want to acknowledge the staff that permitted the survey mission for this dataset with the Sirius AUV, including Ian Mahon, Matthew Johnson-Roberson, Duncan Mercer, George Powell, Ritesh Lal, Paul Rigby, Jeremy Randle and Bruce Crundwell.

[1]All authors are with the Department of Computer Engineering, Universitat de Girona, 17071 Girona, Spain apalomer|pere|dribas|mallios|gvallicrosa at eia.udg.edu

In imaging sonar mosaicking, [6] presented a feature-based registration for two-dimensional forwar-look sonar images while in [7] a Fourier-based registration method to build large-scale mosaics was presented.Moreover, there have been reported several feature-based methods using range sonar sensors such as in [8] and [9]. However, in a natural underwater environment, it is extremely difficult to extract them robustly. For this reason, some researchers have focused their efforts on using featureless methods like occupancy grids and scan matching. In [10], a SLAM algorithm based on a particle filter was used to build an occupancy grid of a sinkhole with the range measurements from multiple pencil-beam sonars.

While bathymetry (elevation) 2.5D maps have been extensively used in the context of terrain based navigation (TBN), there exist few works reporting successful SLAM implementations using a multibeam sonar profiler and bathymetric maps. The pioneering work corresponds to [11] who used cross correlation and Iterative Closest Point (ICP) for coarse and fine registration of bathymetric surface patches respectively. Later, some other methods where reported such as [12], [13].

In [14] a probabilistic ICP was used to register submaps and the optimization of the overall trajectory was done by means of a pose-based EKF-SLAM. That work presented a novel heuristic to reduce the association complexity from $O(n^2)$ to $O(n)$ by taking advantage of the probabilistic formulation of the points forming the submap. Moreover, a subsampling technique was introduced in order to use the areas of the point cloud containing more useful information for the registration and reducing even more the computation time of each registration.

This paper presents several different subsampling techniques in order to improve the work presented in [14]. In this case 3 different groups of subsampling techniques are studied and compared against each other. The first group is based on the distance to a plane. This set of techniques incorporates the criteria used in the previous work, which was gathering more points from the deepest zones, and generalizes that criteria in two steps: fist Distance from mean (Dfm) gathers more points in the places which are not close to the point cloud mean height, second Distance from principal plane (Dfpp) works similar than Dfm but the direction in which the distance is computed is the one with smallest variance rather than the vertical one. The second group of techniques is based on the eigenvalues of the Principal Component Analysis (PCA) of the point cloud and the cell: Curvature (Curv) studies the relationship between the minimal variance and all of them to discriminate whether

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

or not the cell is containing information, and PcaVap takes just the minimum variance for the same purpose. Finally, the third group is based on the eigenvectors of the PCA of the submap and the cell and contains the criterias: Difference of normals (Don), which is based on the module of the difference, and PcaVep, which discriminates using the angle between both normals. Since no ground truth is available for the bathymetric dataset used, the criteria are compared against each other by means of registering different real world point clouds against themselves with random initial guesses. Later, the best technique of the two best groups of subsampling strategies are compared using the SLAM framework proposed in [14].

The rest of the paper is organized as follows: first the registration algorithm that will be used is outlined in section II, then the different subsampling techniques are detailed in III followed by the supporting experimental results and conclusions in sections IV and V respectively.

II. Registration Algorithm

The registration algorithm which is a probabilistic ICP with point-to-point and point-to-plane association, and an heuristic to decrease the complexity of the association step is briefly introduced here. For a more detailed description please refer to [14].

A. Probabilistic ICP

Given a certain point of a point cloud S_i the matching candidates points on an other existing cloud S_j are computed using point-to-point metric with Mahalanobis distance. From within the compatible pairings, which means the pairings that have a Mahalanobis distance smaller than a given threshold, the one with the smallest distance is chosen and used for an initial coarse registration. Once this registration converges, a point-to-plane association is used to refine the result. For every point in S_i, a plane Π_{ij} is fitted into the set of compatible points previously found in S_j. Then, a virtual point corresponding to the projection of the point from S_i into Π_{ij} is used to run a second registration.

After each association stage, a minimization process using least squares is carried out to estimate a displacement $\mathbf{q_{min}}$ which minimizes the addition of the Mahalanobis distance of the association error.

B. Association in Linear Time

Determining correspondences between the points in two point clouds has a high computational cost for ICP-based methods. This is mainly caused because of the large number of different matrix operations, including inversions, which leads to an $O(n^2)$ algorithm. To reduce this cost, we take advantage of the fact that a Gaussian random point $\mathbf{p}_i$ can be graphically represented as an ellipsoid for a desired confidence level α, and that there will be overlapping between the ellipsoids of two points deemed compatible after a Mahalanobis distance test. Therefore, instead of checking correspondences among all the points in a patch, the search can be limited to those points whose ellipsoids overlap. This reduction on the space of exploration decreases the complexity of the algorithm to $O(n)$.

III. Subsampling Criteria

In this section 7 different subsampling techniques that will be compared in the experiments are presented along with an example of the criteria applied to a point cloud (Fig. 1). The techniques can be divided in 3 groups regarding what the technique is based on: distance to a plane (Pockmarks, Dfm and Dfpp), eigenvalues of the PCA analysis (PcaVap and Curv) or eigenvectors of the PCA analysis (PcaVep and Don). The subsampling is done by means of an octree. For each cell of the octree the subsampling criteria is evaluated, and if so, the cell is divided into 8 subcells. At the end only one point is taken from each cell of the octree which is the closest to the center of each cell.

A. Pockmarks

In some regions the sea-bed has craters which make two parts of it distinguishable: the pockmarks (or craters) and the rest. This criteria takes advantage of the a priori knowledge of its existence to sample more points within the craters rather than the rest of the area. This methodology to subsample the point cloud was first presented in [14] in the context of its Bathymetry Based SLAM . The criteria computes the distance d_c along the z axis between the mean of the points in the octree cell and all the point cloud:

$$d_c = \overline{z}_c - \overline{z} \tag{1}$$

where $\overline{z}_c$ is the average height of the points within the octree cell and $\overline{z}$ is the average depth of all the point cloud. If d_c is smaller than a threshold the cell will be divided. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(b).

B. Distance from Mean

The criteria explained in III-A only looks fore holes while many underwater terrains have not only this type of characteristics but also salients, which are the opposite. In this way a more generic subsampling criteria can be achieved by taking the absolute value of d_c from equation 1. If its value is grater than a threshold then the cell of the octree will be divided. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(c).

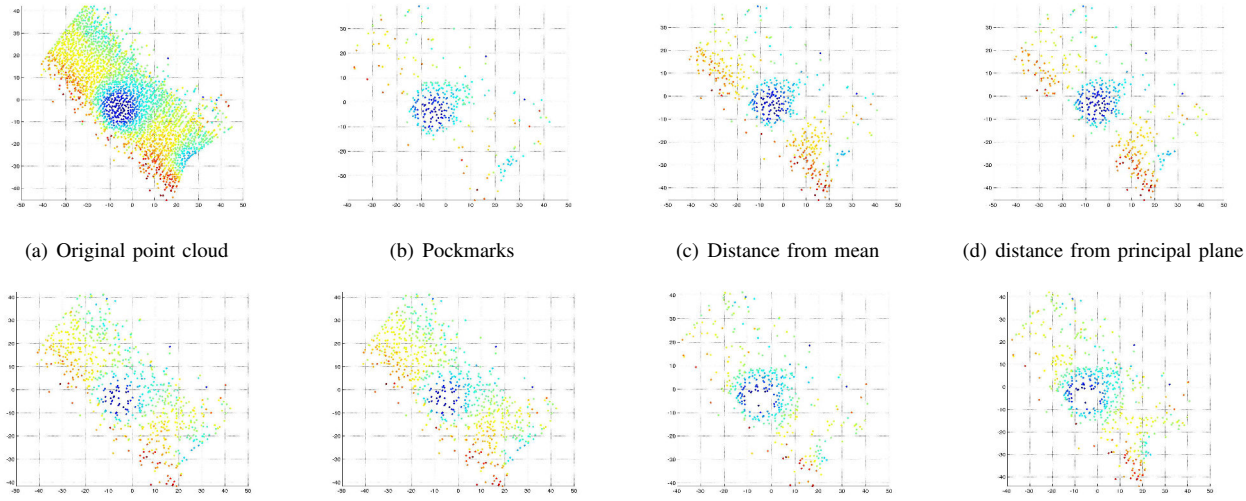
C. Distance from Principal Plane

In order to generalize even more the concept behind the subsampling criteria in the previous subsecitons, the distance d_c can be computed not against the average depth of the point cloud but to its best fitting plane. For this purpose first a PCA analysis of the point cloud is done in order to get its principal directions of variances υ. Let a points ${}^W p$ be a point of the cloud represented in a frame aligned to the world, then a point ${}^V p$ in the space of minimal variance can be computed as follows:

$${}^V p = M\ {}^W p \tag{2}$$

where M is the transformation matrix containing the eigenvectors υ. This type of subsampling is able tot detect either

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)



(a) Original point cloud (b) Pockmarks (c) Distance from mean (d) distance from principal plane

(e) PcaVap (f) Curv (g) Difference of normals (h) PcaVep

Fig. 1. Results of applying the different subsampling techniques (b-h) where the colour of the points represents the depth of these using a patch from the Pockmarks dataset.

holes or salients in a not horizontal terrain. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(d).

D. Difference of Normals

The Don criteria [15] has been proved to work properly in the segmentation of unstructured point clouds. The criteria does a PCA of two set of points: the one corresponding to the whole patch and the one of the points contained in a particular cell of the octree. Then, the PCA returns 3 directions and their 3 variances. The two directions with the largest variances determine the plane that fits the point cloud, while the remaining direction corresponds to the normal of that plane. Once both normals are computed (the one for all the patch $\overrightarrow{\mathbf{n_p}}$ and the one for the cell $\overrightarrow{\mathbf{n_c}}$), Don can be computed as:

$$\overrightarrow{\triangle \mathbf{n}} = \overrightarrow{\mathbf{n_p}} - \overrightarrow{\mathbf{n_c}} \tag{3}$$

if $||\overrightarrow{\triangle \mathbf{n}}||$ is grater than a threshold, which means that $\overrightarrow{\mathbf{n_p}}$ and $\overrightarrow{\mathbf{n_c}}$ are significantly different, it is considered that the cell of the octree contains relevant data and, therefore, will be divided to sample more points from that region. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(g).

E. PcaVep

For this subsampling criteria two PCA analysis are carried out, one for the whole point cloud and one with the points laying within the box of the octree. The angle between both vectors can be computed as:

$$\alpha = atan2(||\overrightarrow{v}_{pc} \times \overrightarrow{v}_c||, \overrightarrow{v}_{pc} \cdot \overrightarrow{v}_c) \tag{4}$$

where $\overrightarrow{v}_{pc}$ is the direction of minimal variance of the point cloud and $\overrightarrow{v}_c$ is the direction representing the same for the points within the octree cell. The box of the octree will be divided if α is grater than a threshold. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(h).

F. Curvature

In this case the metric used in order to determine whether or not a cell is containing interesting parts of the point cloud is by computing the percentage of variance in the direction of minimal variance:

$$c = \frac{\min \lambda}{\sum \lambda} \tag{5}$$

where λ are the eigenvalues of the PCA analysis of the points laying within the cell. If this curvature is grater than a given threshold the cell will be divided. An example of this subsampling strategy can be seen in Fig. 1(f).

G. PcaVap

This subsampling method consist in a basic PCA analysis of the points laying within a box of the octree. If the smallest eigenvalue ($\min \lambda$), which represents the variance of the points in the perpendicular direction of its best fitting plane, is grater than a threshold the box is divided. An example of this subsampling strategy strategies can be seen in Fig. 1(e).

IV. Experiments and Results

In this section first the experiments to determine which subsampling criteria is better is presented and then the results of applying the SLAM proposed in [14] with the best subsampling strategies are shown. The bathymetric dataset used was kindly provided by the School of Aerospace Mechanical and Mechatronic Engineering of the University of Sydney and has already been used for demonstrating bathymetric SLAM [16], [12] and [14].

A. Subsampling discrimination

In order to determine which strategy is the best, the experiment done is the following: given a real bathymetric dataset, a subset of ten submaps or point clouds are drawn from

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DoF	x (m)	y (m)	z (m)	ϕ (rad)	θ (rad)	ψ (rad)
Mean	0	0	0	0	0	0
Std	10	10	5	0.1	0.1	0.5

TABLE I
PARAMETERS OF THE GAUSSIAN ERROR ADDED IN THE INITIAL GUESS.

the whole dataset. For each point cloud 15 different initial guesses for the registration algorithm are drawn from the normal distribution, which parameters can be seen in table I. For each initial guess and point cloud the registration is carried out with all the proposed subsampling methodologies.

The results of this experiments can be seen in Fig. 2 (its numerics values in table II) where the mean of the module of all the errors (the error vector contains the actual solution of the registration algorithm in 6DOF) obtained by the different subsampling criteria among all the experiments are represented. First thing to be mentioned is the fact that non of the methods has an error smaller than 1.8. This is due to the fact that the convergence criteria used for ending the registration algorithm is based on the derivative of the error rather than the absolute error and, although it tends to converge to the right solution, it stops because of its finishing criteria. In Fig. 3 the evolution of the association error can be seen and it is possible to observe that the derivative of the error at the last iterations is, compared to the first iterations, much more smaller. The second thing to be noted is the fact that both eigenvalue based criteria (PcaVap and Curv) performs roughly the same, and both obtain grater error than the rest. Regarding the rest of the methods, the subsampling criteria and the probabilistic ICP without subsampling obtain similar solutions while the probabilistic ICP without subsampling spends much more time on the registration than the ones with subsampling (5906s in front of a maximum of 90.6s). In the other subgroup, the one based on the normals (Don and PcaVep), it is possible to identify that PcaVap, which studies the angle between the normals, obtains better results than Don. Furthermore, it is possible to observe that, within the group of subsampling criteria regarding distance to a plane (Pockmarks, Dfm and Dfpp), while the formulation of the subsampling becomes more generic (from Pockmarks to Dfpp) the mean of the error decreases, being Dfpp not only the best within the group, but the best of all the subsampling criteria.

B. SLAM

Since our aim is to build bathymetric maps of the seabed, the following step is to apply the criteria into real scenarios. For this purpose, the algorithm presented in [14] will be used to solve the SLAM problem.

The algorithm used divides the whole robot trajectory of a certain mission into submaps, which have been used in the previous experiment as the point clouds. This submaps are created by compounding the multibeam sonar sensor data with the robot position at that time and accumulating them in the same reference frame. This submaps can be

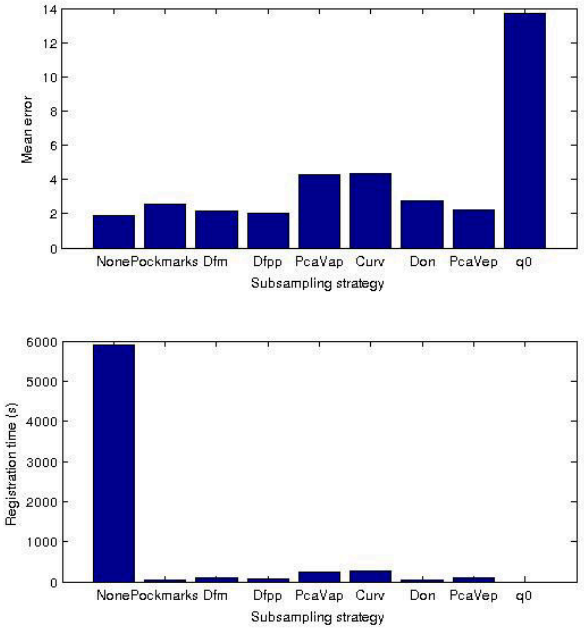


Fig. 2. (Top) Bar plot of the mean error after the registration of all the initial guesses and surfaces (None-PcaVep) and the mean of all the initial guesses ($\widehat{q}0 = 13.7042$). (Bottom) Time spent for each subsampling criteria to do one registration with random initial guess.

Criteria	Error	Time (s)
None	1.18776	5906.0
Pockmarks	2.5821	44.1
Dfm	2.1593	85.6
Dfpp	2.0348	83.12
PcaVap	4.3035	234.6
Curv	4.3168	260.4
Don	2.7460	53.9
PcaVep	2.2134	90.6

TABLE II
NUMERICAL RESULTS FOR FIG. 2

closed either because a reach relief is being observed (small patches) or because a a non-rich relief is being stored in the cloud and the drift contained within the submap would not represent properly the environment. Once a submap is closed all of it is referenced to its middle position to produce a more convenient uncertainty distribution among the points that form the submap. Every time a new submap is closed its middle position is introduced in the state vector of an Extended Kalman Filter (EKF) and a registration is carried out for each overlapping submap with the same algorithm as explained in section II-A. The information coming from the results of the registrations are incorporated using the typical EKF equations.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

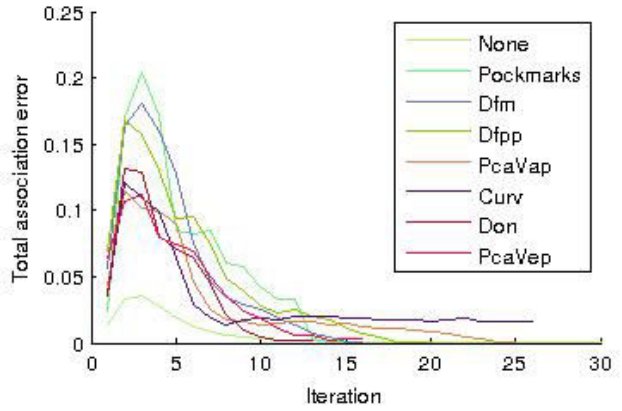
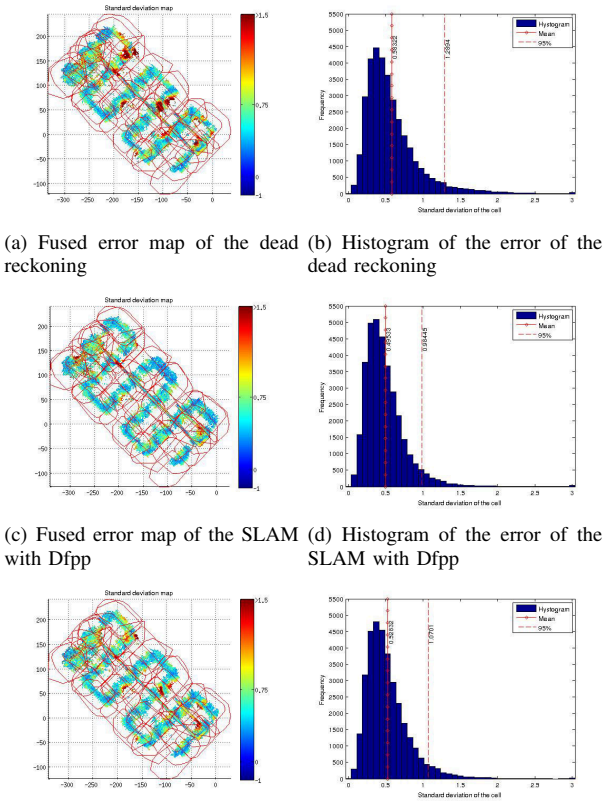


Fig. 3. Evolution of the Mahalanobis error of a random initial guess for a random point cloud.

	Dead Reckoning	SLAM + Dfpp	SLAM + PcaVep
Total error addition	20038.6	16984.7	17936.0
Improvement[1]	-	15.24%	10.49%
Error mean	0.58386	0.49533	0.52187
Improvement[1]	-	15.16%	10.62%
$Q_{3/4}$	1.2894	0.98445	1.0701
Improvement[1]	-	23.65%	17.01%

TABLE III
NUMERICAL RESULTS FOR FIG. 4. [1] REFERS TO THE RELATIVE IMPROVEMENT COMPARED TO DEAD RECKONING DATA OF THE ROW ABOVE IT.

In Fig. 4 the fused error maps for the dead reckoning and the SLAM with Dfpp and PcaVep, which are the best of its type of the two best types, computed as in [17] are presented along with their error histograms. In table III the numerical results from Fig. 4 are shown. It can be seen directly from fused error maps and the histograms that both SLAM techniques improve the dead reckoning. In the case of the PcaVep the dead reckoning is improved in around 10% for the mean and the total error while the third quartile ($Q_{3/4}$) is reduced even more, up to 17% which indicates that not only the error is smaller but that there is less big errors. Regarding Dfpp, it has been observed that the improvement is even better in all terms, improving more than 15% of the dead reckoning map, and around 5% of the PcaVep, in both mean and addition of the error while reducing the $Q_{3/4}$ up to 23.65%.



(a) Fused error map of the dead reckoning (b) Histogram of the error of the dead reckoning

(c) Fused error map of the SLAM with Dfpp (d) Histogram of the error of the SLAM with Dfpp

(e) Fused error map of the SLAM with PcaVep (f) Histogram of the error of the SLAM with PcaVep

Fig. 4. Fused error maps (a,c,e) and histogram errors (b,d,f) of the bathymetries. The color or the error map goes from small error (dark blue) to high error (dark red). In the histograms it is possible o observe the mean of the error and also the third quartile ($Q_{3/4}$).

V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

We have presented 7 different types of subsampling criteria: Pockmarks, Dfm, Dfpp, PcaVap, Curv, Don and PcaVep. It has been shown that the registrations of most of them, but the ones relaying in eigenvalues, have similar results than the registration algorithm without subsampling while spending more than 10 times less of time for the registration without subsampling. Moreover it has compared the two best criteria of the two best types (Dfpp and PcaVep) in a real bathymetric scenario confirming that both criteria improve the resultant error map and that Dfpp performs around 5% better than PcaVep which can improve the dead reckoning in around 10%.

Future work will include further study of the relationships between subsampling criteria and the terrain. In this way, some seabed areas have specific characteristics, which by means of incorporating that prior knowledge into the subsampling strategies, might produce better registrations. Moreover the different criteria should be tested against different datasets to asses the true potential of each one.

REFERENCES

[1] T. Bailey and H. Durrant-Whyte, "Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part II," *Robotics Automation Magazine, IEEE*,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

vol. 13, no. 3, pp. 108–117, 2006.

[2] S. Williams and I. Mahon, "Simultaneous Localisation and Mapping on the Great Barrier Reef," in *Robotics and Automation (ICRA). Proceedings. IEEE International Converence on*, vol. 2, 2004, pp. 1771–1776.

[3] R. Eustice, H. Singh, J. Leonard, M. Walter, and R. Ballard, "Visually Navigating the RMS Titanic with SLAM Information Filters," *Proceedings of the Robotics Science and Systems*, 2005.

[4] M. Johnson-Roberson, O. Pizarro, S. B. Williams, and I. Mahon, "Generation and Visualization of Large-Scale Three-Dimensional Reconstructions from Underwater Robotic Surveys," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 21–51, 2010.

[5] A. Kim and R. M. Eustice, "Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection Using Visual Saliency," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 3, pp. 719–733, Jun. 2013. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6410440

[6] M. D. Aykin and S. Negahdaripour, "On Feature Matching and Image Registration for Two-dimensional Forward-scan Sonar Imaging," *Journal of Field Robotics*, vol. 30, no. 4, pp. 602–623, 2013.

[7] N. Hurtós, X. Cufí, Y. Petillot, and J. Salvi, "Fourier-based Registrations for Two-dimensional Forward-looking Sonar Image Mosaicing," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Ieee, Oct. 2012, pp. 5298–5305. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6385813

[8] P. Newman and J. Leonard, "Pure Range-Only Sub-Sea SLAM," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Ieee, 2003, pp. 1921–1926. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1241875

[9] D. Ribas, P. Ridao, J. D. Domingo, and J. Neira, "Underwater SLAM in Man-Made Structured Environments," *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 11-12, pp. 898–921, 2008.

[10] N. Fairfield, D. Jonak, G. Kantor, and D. Wettergreen, "Field Results of the Control, Navigation, and Mapping Systems of a Hovering AUV," in *Proceedings of the 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 2007.

[11] C. Roman and H. Singh, "A Self-Consistent Bathymetric Mapping Algorithm," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 1-2, pp. 23–50, 2007.

[12] S. Barkby, S. B. Williams, O. Pizarro, and M. Jakuba, "A Featureless Approach to Efficient Bathymetric SLAM Using Distributed Particle Mapping," *Journal of Field Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 19–39, 2011.

[13] R. A. Stuckey, "Navigational Error Reduction of Underwater Vehicles with Selective Bathymetric SLAM," in *IFAC Workshop Navigation, Guidance & Conrol of Underwater Vehicles (NGCUV2012)*, Porto, 2012.

[14] S. Zandara, P. Ridao, D. Ribas, A. Mallios, and A. Palomer, "Probabilistic Surface Matching for Bathymetry Based SLAM," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013.

[15] Y. Ioannou, B. Taati, R. Harrap, and M. Greenspan, "Difference of Normals as a Multi-Scale Operator in Unorganized Point Clouds," *ArXiv e-prints*, 2012.

[16] S. Barkby, S. Williams, O. Pizarro, and M. Jakuba, "An Efficient Approach to Bathymetric SLAM," in *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, pp. 219–224.

[17] C. Roman and H. Singh, "Consistency based error evaluation for deep sea bathymetric mapping with robotic vehicles," in *Robotics and*, no. May. Ieee, 2006, pp. 3568–3574.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

OPERACIÓN ÓPTIMA DE LA PLANTA DE LOS 4 TANQUES

Mauricio Alva Howes
Barcelona, España, mauricio.alva.howes@hotmail.es

Alejandro Camas Delgado
Barcelona, España, alejandro.camasdelgado@gmail.com

Néstor García Hidalgo
Barcelona, España, nestorgh91@gmail.com

Tutor: Ramon Costa Castelló
Barcelona, España, ramon.costa@upc.edu

ETSEIB, Universitat Politècnica de Catalunya

Resumen

Este documento presenta la metodología empleada para operar de forma óptima la planta de los 4 tanques según los criterios establecidos en el concurso en Ingeniería de Control 2014[1]. El sistema de control desarrollado será puesto a prueba en un ensayo tipo, especificado en la descripción del concurso. Durante el ensayo, los costes de operación cambiarán varias veces y la planta estará sujeta a unas restricciones de operación que de no ser cumplidas, una penalización será impuesta.

Palabras Clave: CEA, control, 4 tanques, Simulink

1 INTRODUCCIÓN

El concurso organizado por el Grupo Temático de ingeniería de control del Comité Español de Automática, *Concurso en Ingeniería de Control 2014*, tiene como objetivo el desarrollo de un controlador para la planta de los 4 tanques que se encuentra situada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. Esta es una implementación de la planta propuesta por Karl H. Johansson [2] que no sigue con exactitud el esquema original.

El documento está estructurado de la siguiente manera: la planta y los objetivos de control son presentados en los apartados 2 y 3, respectivamente. Después, en la sección 4, se describe el algoritmo para encontrar la trayectoria óptima de operación. En el apartado 5, el controlador utilizado es presentado. Finalmente, en el apartado 6 se comprueban los resultados y se concluye el trabajo.

2 LA PLANTA DE LOS 4 TANQUES

2.1 LA PLANTA REAL

En la planta real se dispone de un único grupo de presión que proporciona un caudal de entrada a las ramas que llenan cada uno de los depósitos. Cada una de estas ramas tiene instalados un caudalímetro magnético y una válvula de regulación en serie para controlar el caudal que circula por ellas. Esto permite emular el efecto de los caudales manipulables y las válvulas de 3 vías de la planta original mediante la adecuada selección de las referencias de caudal de cada rama. Esto responde a un esquema de control en cascada que añade una dinámica adicional respecto al modelo original.

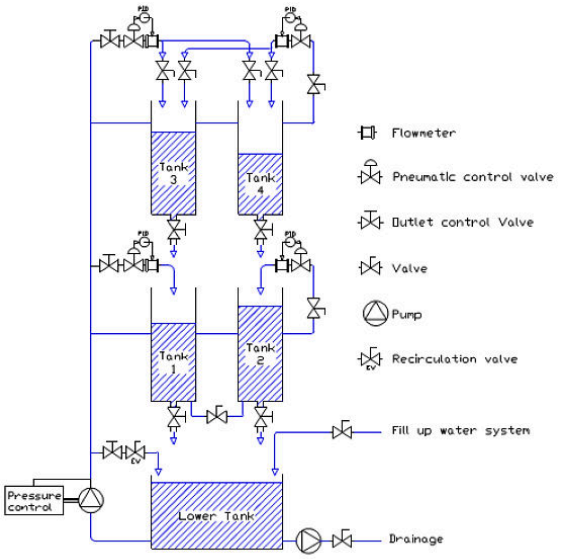


Figura 1: Esquema de la planta real, extraída de [1]

Como muestra la figura 1, la planta real consta de cuatro depósitos transparentes de $1{,}3\,m$ de altura

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

aproximadamente. La instrumentación utilizada en la implementación de la planta es de tipo industrial proporcionada por la empresa Siemens: válvulas de regulación neumática, caudalímetros magnéticos y sensores de presión para medir los niveles. Un autómata programable *Siemens S7-200* es el encargado de gestionar la entrada y salida de señales de la planta, del control local de los caudales y de la supervisión de la planta. En un *PC 5 CIC2014* externo conectado al autómata, un servidor *OPC* se comunica con el *PLC* que permite el control remoto desde clientes *OPC*, como *Matlab/Simulink* o *Labview*.

2.2 MODELO

El modelo de la planta de Johansson se puede derivar de primeros principios. Este modelo viene dado por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_a q_a}{A\,3600} \quad (1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_b q_b}{A\,3600} \quad (2)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_b) q_b}{A\,3600} \quad (3)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_a) q_a}{A\,3600} \quad (4)$$

en las que h_i denota el nivel de líquido en el tanque i. Los caudales de cada rama se denotan q_a y q_b y son variables manipulables.

El parámetro a_i es la sección equivalente del orificio de descarga del depósito i y la sección de todos los tanques es igual y se denota por A. Los parámetros γ_a y γ_b indican la apertura de la válvula de 3 vías.

La planta real presenta dinámicas inmodeladas en los caudales de alimentación de los tanques así como incertidumbres y ruidos en las medidas que no están presentes en el modelo de primeros principios. Además la actualización del valor de las variables manipulables que se aplicarán y la actualización de las medidas de los sensores se realiza cada $5\ s$.

2.3 PARÁMETROS

Los parámetros presentes en el modelo de la planta toman los siguientes valores:

- Sección de los depósitos

$$A = 0{,}03\ m^2$$

- Sección equivalente de los orificios de descarga

$$a_1 = 1{,}3104 \cdot 10^{-4}\ m^2$$

$$a_2 = 1{,}5074 \cdot 10^{-4}\ m^2$$

$$a_3 = 9{,}2673 \cdot 10^{-5}\ m^2$$

$$a_4 = 8{,}8164 \cdot 10^{-5}\ m^2$$

- Apertura de las válvulas de 3 vías

$$\gamma_a = 0{,}3$$

$$\gamma_b = 0{,}4$$

- Restricciones de operación de las variables

$$0{,}2\ m \le h_i \le 1{,}2\ m \quad i = 1, \dots, 4 \quad (5)$$

$$0\ m^3/h \le q_j \le 2{,}5\ m^3/h \quad j = a, b \quad (6)$$

- Tiempo de muestreo

$$T_m = 5\ s$$

- Amplitud máxima del ruido de la planta

$$A_r = 5\ mm$$

3 OBJETIVOS DE CONTROL

Con el fin de poder evaluar qué sistema de control es mejor, se define un índice de desempeño en el ensayo y que interesa sea lo más pequeño posible. Éste se rige por la expresión (7), donde t es el tiempo total del ensayo, J es la función de coste de operación (véase ecuación (8)) y J^* es la función de costes en el punto de trabajo óptimo (el cual únicamente depende de los costes c y p). El término J_r representa el coste asociado a la violación de las restricciones de operación de los niveles. Así, por cada centímetro que se viole la restricción en cada depósito, el coste aumenta $10\ u.m./s$.

$$ID(t) = \int_0^t J\big(h(\tau), q(\tau), c(\tau), p(\tau)\big) - J^*\big(c(\tau), p(\tau)\big) + J_r\big(h(\tau)\big) d\tau \quad (7)$$

$$J(h, q, c, p) = (q_a^2 + c \cdot q_b^2) + p\frac{V_{min}}{A(h_1 + h_2)} \quad (8)$$

3.1 ENSAYO

En el ensayo, la planta partirá de un punto de equilibrio óptimo. Tras un pequeño tiempo, los

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

precios unitarios variarán y en consecuencia el punto de operación óptimo. Transcurrido otro cierto intervalo de tiempo, los costes volverán a cambiar. Tras varios cambios del punto de equilibrio, el ensayo se finaliza.

3.2 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control escogido para la planta se muestra en la figura 2. Las señales de los costes, las alturas y los caudales de referencia se envían a un bloque optimizador en línea (*RTO, Real-Time Optimizer*). Este bloque calcula la trayectoria de menor coste para la planta desde el estado actual al indicado por las referencias. Posteriormente, un controlador se encargará de que la planta siga esta trayectoria óptima.

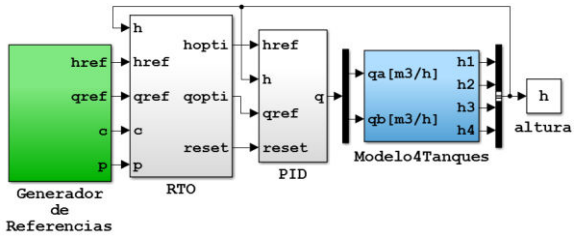


Figura 2: Esquema del sistema de control

4 TRAYECTORIA ÓPTIMA

Dado que el método de evaluación de la competición se centra en el valor del índice de desempeño, se diseña el control con el objetivo de optimizar dicho valor y no el de alcanzar el punto de referencia en el mínimo tiempo.

Aun así, está claro que si el punto de referencia se mantiene constante durante el tiempo suficiente, la planta deberá alcanzar este punto, tarde o temprano, si se quiere optimizar el índice de desempeño. Esto es debido a que el punto de referencia es aquel punto de equilibrio que conlleva menor coste en estado estacionario.

Se decide encontrar la trayectoria óptima de menor coste de la planta, sin considerar el ruido, para un determinado cambio en los costes c y p. Esto se hace numéricamente mediante la función *fminsearch* de *Matlab*.

Para el caso en el que los costes varían de $c = 1$ y $p = 20$ a $c = 1$ y $p = 30$ y la planta se simula durante $1200\ s$, las curvas que se obtienen para los caudales, las alturas y el coste de operación se encuentran en las figuras 3, 4 y 5 respectivamente.

Se observan tres tramos diferenciados en las curvas de los caudales: un primer tramo en el que los caudales varían y tienden hacia los valores del equilibrio (marcados con línea discontinua), un tramo intermedio en el que se puede considerar que los valores son constantes y un tramo final en el que se inicia el vaciado de los tanques. Estos tres tramos también se identifican en las otras dos figuras puesto que las variables representadas están relacionadas.

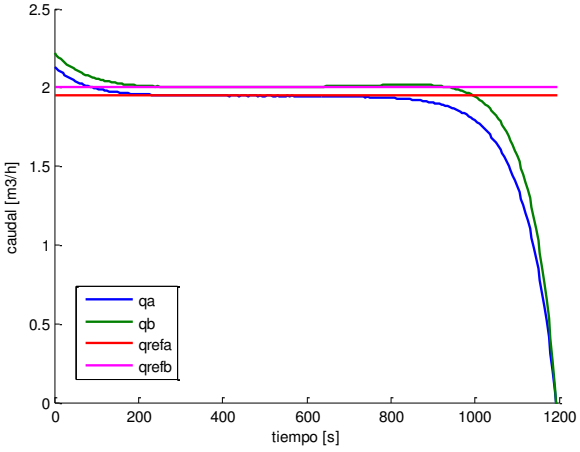


Figura 3: Evolución de los caudales

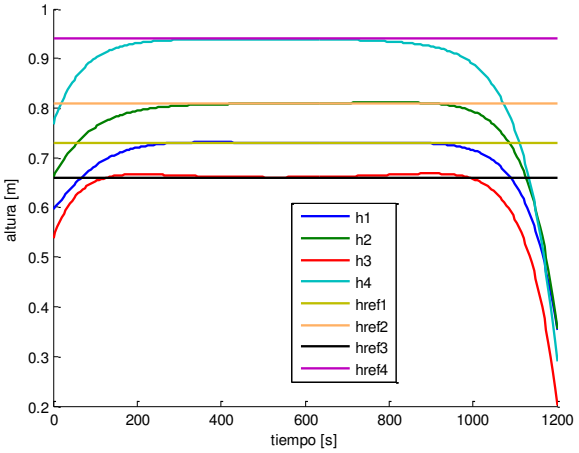


Figura 4: Evolución de las alturas

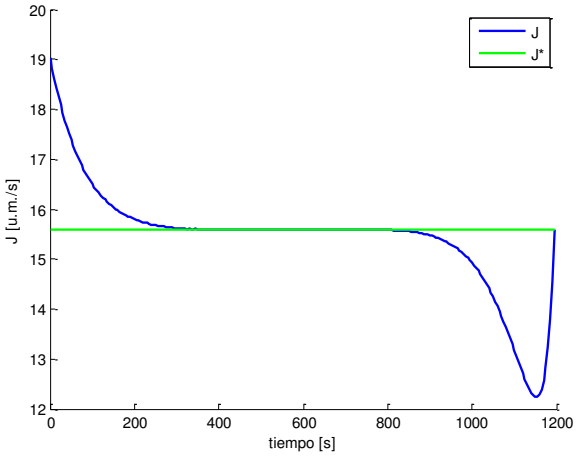


Figura 5: Evolución de J

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El primer comportamiento es intuitivo, ya que si los tanques han de subir de nivel, lo lógico es bombear más caudal del necesario al principio y reducirlo poco a poco. Sin embargo, el tramo final, menos intuitivo, es correcto y provocado porque el índice de desempeño no impone ninguna restricción o coste sobre el estado final de la planta.

De esta manera, durante los últimos instantes del ensayo, se deja de bombear agua (esto supone un ahorro en los costes mientras el nivel de los tanques no disminuya demasiado) y se vacían los tanques de forma controlada. Cabe destacar que en ningún momento se produce una violación de las restricciones de operación de la planta. Esto es de esperar, ya que este hecho implicaría una penalización que haría aumentar el índice de desempeño.

Estos comportamientos se han producido para todos los casos ensayados. También es importante destacar que el primer transitorio siempre dura unos 400s, tiempo menor al tiempo ensayado.

Para reducir el tiempo de optimización (ya que éste era muy elevado y la optimización en tiempo real sería inviable), se busca una aproximación de la trayectoria óptima para el primer tramo que sea adecuada para cualquier variación de los costes c y p. No se busca una aproximación para el tercer tramo (vaciado), ya que durante el ensayo se producen distintos cambios de los costes y se desconoce el momento en que finaliza el ensayo.

La función escogida deberá ajustarse a los valores de los caudales durante los primeros $400\,s$ y después mantener un valor constante hasta el próximo cambio del punto de operación.

De las expresiones ensayadas, la que mejor se aproxima a la consigna tiene la siguiente expresión

$$q_j(t) = \left(q_{ref_j} + \alpha_j \cdot e^{-\beta_j \cdot t}\right) \cdot u(t) \quad j = a, b \qquad (9)$$

Ésta siempre tenderá al valor del caudal de equilibrio siempre y cuando β sea positiva. Variando los valores de α y β se puede variar el valor inicial del caudal y el instante en el que ya se puede considerar que la planta ha llegado al estacionario.

La función escogida, además, reduce enormemente el número de parámetros a optimizar (tan sólo 4, dos por cada caudal). Además permite un cálculo de la optimización en un tiempo inferior al tiempo de muestreo.

Para los casos ensayados, el error cometido al aproximar la curva óptima de los caudales es del orden de $10^{-3}\,m$, suficientemente pequeño teniendo en cuenta que la planta se ve afectada por un ruido con amplitud $5 \cdot 10^{-3}\,m$. De este modo, se da por válida la aproximación realizada.

4.1 BLOQUE RTO

Para incorporar el cálculo de la trayectoria óptima se ha implementado un bloque (bloque *RTO*) en el modelo *Simulink* de la planta que ejecuta el siguiente algoritmo. Además de calcular los caudales, se obtiene una señal de *reset* que se activa cuando se produce un cambio en los costes y que se utiliza en el controlador.

Algoritmo 1 Trayectoria óptima

Requiere:
- $\boldsymbol{h(k)}$: Vector con las alturas de los 4 tanques en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{h_{ref}(k)}$: Vector con las alturas de referencia de los 4 tanques en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{q_{ref}(k)}$: Vector con los dos caudales de referencia en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{c(k)}$: Coste $\boldsymbol{c}$ en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{p(k)}$: Coste $\boldsymbol{p}$ en el instante $\boldsymbol{k}$.

Devuelve:
- $\boldsymbol{h_{opti}(k)}$: Vector con las alturas de los 4 tanques para la trayectoria óptima en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{q_{opti}(k)}$: Vector con los caudales para la trayectoria óptima en el instante $\boldsymbol{k}$.
- $\boldsymbol{reset(k)}$: Señal de $\boldsymbol{reset}$ en el instante $\boldsymbol{k}$.

while $true$ **do**
  if $InitialState(\,)$ **then**
    $\alpha = [0\ 0]$
    $\beta = [0\ 0]$
    $t = 0$
    $q_{opti}(k) = q_{ref}(k)$
    $h_{opti}(k) = h_{ref}(k)$
    $reset(k) = 0$
  else
    if $c(k) \neq c(k-1)$ **or** $p(k) \neq p(k-1)$ **then**
      $[\alpha, \beta] = optimize(c(k),\ p(k),\ h(k),$
      $h_{ref}(k),\ q_{ref}(k))$
      $t = 0$
      $q_{opti}(k) = q_{ref}(k) + \alpha$
      $h_{opti}(k) = h(k)$
      $reset(k) = 1$
    else
      $t = t + Tm$
      $q_{opti}(k) = q_{ref} + \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot t)$
      $h_{opti}(k) = next_h_{opti}(q_{opti}(k), h_{opti}(k-1))$
      $reset(k) = 0$
  end if
end while

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

5 CONTROLADOR

El control de la planta se ha realizado con dos lazos monovariables usando controladores tipo *PID* que controlan los niveles de los depósitos inferiores (véase figura 6).

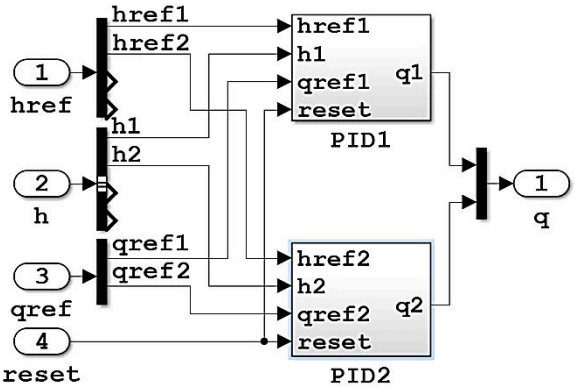


Figura 6: Esquema del controlador de la planta

Ambos lazos han sido dotados de *feedforward* y, dado el rango finito de operación de los actuadores, también de *anti-windup*. Se ha incorporado un *reset* a la parte integradora del controlador PID para poder poner a cero el valor acumulado del integrador. La estructura resultante para cada controlador PID se muestra en la figura 7.

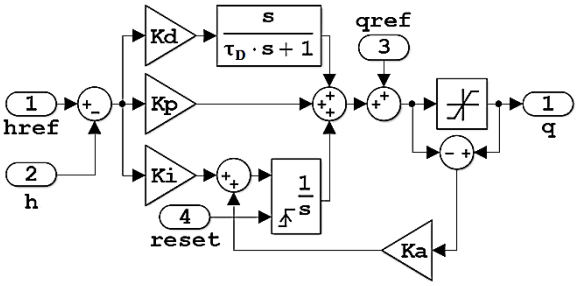


Figura 7: Esquema de uno de los bloques PID

Además, como los caudales están acotados debido a la existencia de un caudal máximo y mínimo, se requiere un elemento saturador a la salida de cada lazo monovariable.

5.1 ESTABILIDAD Y SINTONIZACIÓN

El controlador de la planta consta de 8 parámetros que han de ser configurados de forma que el controlador sea suficientemente rápido para cualquier punto de funcionamiento de la planta y que en ningún momento inestabilice el sistema.

Para sintonizar el controlador y definir así los parámetros del controlador, se decide minimizar la norma *H2*. Dicha norma supone el área total de la gráfica amplitud-tiempo de la respuesta del sistema a un impulso unitario. Minimizándola, se favorece que la respuesta del sistema difiera lo mínimo del valor deseado.

El sistema sobre el que se calcula es el formado por el anillo en lazo cerrado de la planta y el controlador, formando éste último parte de la realimentación.

Puesto que el modelo lineal de la planta varía según el punto de operación, no existe un controlador óptimo para todos los posibles valores. El controlador escogido deberá ser aquel que presente un mejor comportamiento medio para todo el rango de trabajo.

El conjunto de puntos de operación está acotado por las restricciones en las alturas de los depósitos y los caudales. Éste se presenta en la figura 8.

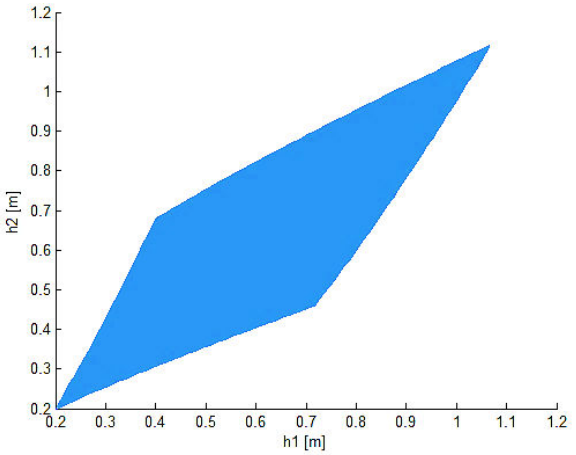


Figura 8: Zona de trabajo de la planta

Se decide escoger los parámetros del controlador que minimicen la suma de las normas H2 del sistema en varios puntos de trabajo. Concretamente, los puntos de trabajo escogidos se encuentran en la tabla 1.

$h_1\ [m]$	0,33	0,45	0,48	0,62	0,67	0,81	0,92
$h_2\ [m]$	0,35	0,50	0,62	0,52	0,76	0,70	0,91

Tabla 1: Puntos de trabajo escogidos

Estos puntos están distribuidos uniformemente por toda la zona de trabajo y son una muestra representativa de ella. De todos modos, se ha comprobado la estabilidad del sistema realimentado para toda el área de trabajo.

Las constantes de la realimentación del *anti-windup* se han de escoger con la única condición de que este lazo sea estable (K_{a_i} positivas). También se ha de tener en cuenta que cuánto mayores sean, menor será el efecto de la saturación sobre los integradores.

Finalmente se obtienen los siguientes parámetros para el controlador, definidos en la tabla 2.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

i	K_{p_i}	K_{i_i}	K_{d_i}	τ_{d_i}	K_{a_i}
1	1,7230	10^{-7}	0,568	10,235	1000
2	1,6934	0	0,712	7,914	1000

Tabla 2: Parámetros de los controladores

6 SIMULACIÓN

Una vez configurado el bloque *RTO* y sintonizados los parámetros del controlador, se procede a la verificación de la optimización del modelo. Para ello se realizan tres simulaciones del ensayo tipo correspondiente al caso 1 [1], en distintas condiciones.

En primer lugar, se simula la planta controlador ni bloque RTO, sólo con el *feedforward*, obteniéndose un índice de desempeño $ID = 272{,}13$. Se simula, a continuación, la planta incorporando controlador y bloque *RTO*, logrando un $ID = 229{,}11$. Se demuestra así la reducción significativa del índice de desempeño introducida por el seguimiento de la trayectoria óptima.

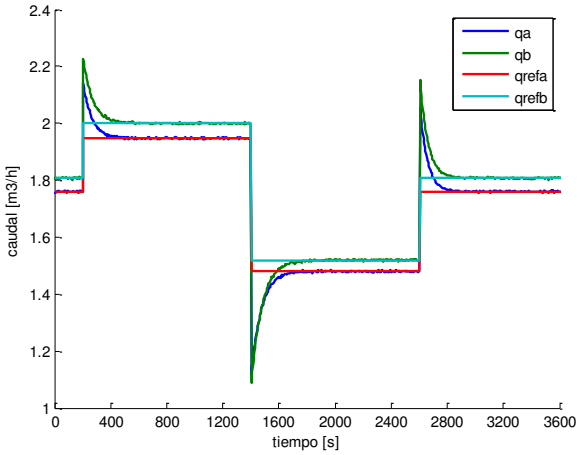


Figura 9: Evolución de los caudales

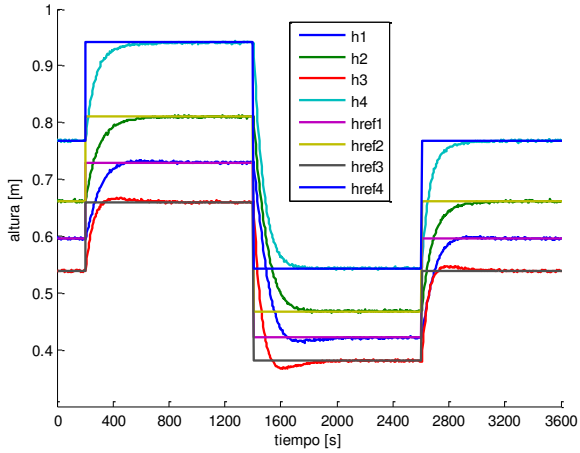


Figura 10: Evolución de las alturas

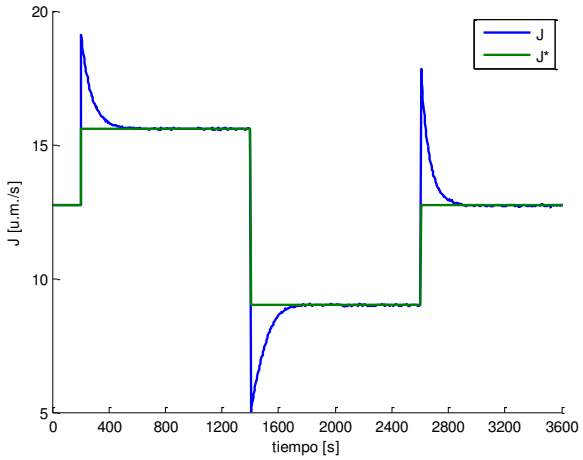


Figura 11: Evolución de J

Por último, para comprobar que se ha obtenido un mínimo, se varían levemente los parámetros aumentándolos en un 1% alcanzando así un valor ligeramente superior: 229,84.

Para la simulación de la planta con el sistema de control presentado en este documento, se presenta la evolución de los caudales, alturas y valor de J en las figuras 9, 10 y 11, respectivamente.

Se puede ver, así, el buen funcionamiento del controlador. En consecuencia, se valida el método escogido para el control de la planta.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer su esfuerzo y dedicación a Daniel Limón, miembro del Comité Español de Automática, por haber resuelto las dudas que surgían durante la realización del proyecto y a nuestro tutor, Ramon Costa Castelló, por su entrega y dedicación a lo largo del desarrollo del proyecto.

Referencias

[1] Grupo Temático en Ingeniería de Control de CEA, (2013) Concurso en Igeniería de Control 2014. Operación optima de la planta de los 4 tanques. Descripción de la fase 1

[2] Karl H. Johansson, (2000) The quadruple-tank process, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol 8.

[3] The MathWorks Inc., (2002) Matlab : version 6 the language of technical computing : Using Matlab

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Nonlinear Predictive Control for the Four-Tanks Plant Flow Regulation

J. Acevedo[1], J. Luna[2] and N. Rosanas[3]
Universitat Politècnica de Catalunya
[1]jacevedo@iri.upc.edu, [2]jluna@iri.upc.edu, [3]nrosanas@iri.upc.edu

Tutor: R. Costa

Abstract

The four-tanks system is well-known and a considerable number of works study it in the existent literature. This work proposes a nonlinear model predictive control (NMPC) design to regulate the water flow inputs of the four tanks system. As an initial approach, the implementation is performed in Simulink® prior to a foreseeable real-plant application of the proposed solution. Simulation results are presented and discussed to show the performance of the controller. Improvements are enumerated and analysed.

Keywords: predictive control, nonlinear model, zero dynamics, four-tanks system

1 Introduction

The objective of the present work is to design a controller to participate in the CEA challenge, the first phase of which, consists in the design of a controller and test its behaviour in a simulation environment. However, the second phase of the challenge includes the implementation of the proposed solution in a real system. Because of this, certain aspects of the design procedure will have to take into account the applicability of the controller to a real operating plant.

Since MPC is based on the mathematical model of the plant (the four-tanks system in this case) it is a technique very sensitive to model accuracy. This dependence on the model allows several approaches when designing a MPC-based control strategy: from the linear case [7], to the nonlinear MPC (NPMC) [10], hybrid models [8] and piecewise affine (PWA) systems [2].

In this work, to achieve the control objectives, a model based NMPC strategy is proposed to control the nonlinear system. The inclusion of the nonlinearities of the plant in the controller allow to perform the regulation of the studied plant. In recent studies [9] these kind of approaches have been analysed with good results and the computer burden is low enough to consider real-time applications for the controllers.

The main contribution of this paper is a nonlinear implementation of a model predictive control that is sufficiently fast enough to be implemented in the future. The discretization time and the control and prediction horizons are a key aspect to take into account when performing the design and tuning of the controller.

The rest of the paper is organised as follows. To introduce the problem, the four tanks system description can be found in section 2. In section 3 the proposed NMPC strategy theoretical basis is described. Simulation results are extracted and studied in detail in section 4. Finally, in section 5 the conclusions of this paper are presented and some improvements are proposed for the future.

2 System Description

The plant employed to design the controllers is the four-tanks system described by [5]. It is a multivariable system with two manipulable variables (water flows q_a and q_b) and four state variables (water levels h_1, h_2, h_3 and h_4). Depending on the aperture of de valves (determined by the values γ_a and γ_b) the system dynamics present non-minimum phase dynamics and nonlinearities.

The differential equations that model the nonlinear dynamics of the system can be expressed as

$$A\frac{dh_1}{dt} = -a_1\sqrt{2gh_1} + a_3\sqrt{2gh_3} + \gamma_a\frac{q_a}{3600}, \quad (1a)$$

$$A\frac{dh_2}{dt} = -a_2\sqrt{2gh_2} + a_4\sqrt{2gh_4} + \gamma_b\frac{q_b}{3600}, \quad (1b)$$

$$A\frac{dh_3}{dt} = -a_3\sqrt{2gh_3} + (1-\gamma_b)\frac{q_b}{3600}, \quad (1c)$$

$$A\frac{dh_4}{dt} = -a_4\sqrt{2gh_4} + (1-\gamma_a)\frac{q_a}{3600}. \quad (1d)$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

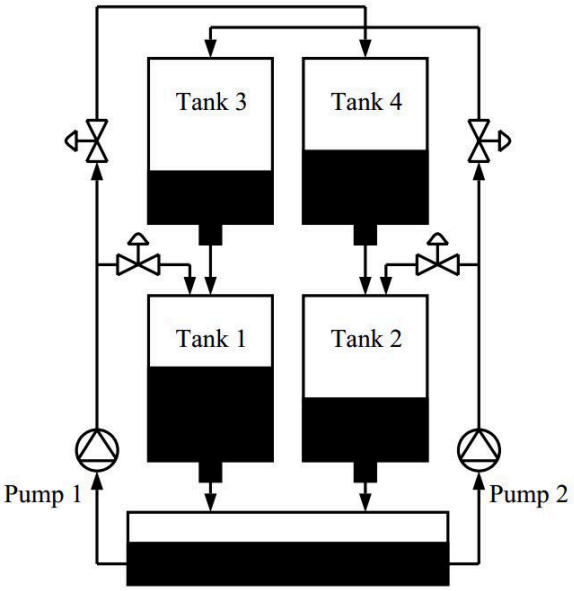


Figure 1: Schematic of the four-tank system [3]

From equation (1) a control-oriented model will be developed to implement the NMPC strategy as described in the next section. A graphical schematic of the four-tanks system is shown in figure 1.

3 Proposed Solution

3.1 The Nonlinear Model Predictive Control Approach

The NMPC strategy is chosen with the objective of not losing accuracy due to the linearisation of the system needed in the traditional MPC approach. The advantage of this formulation is that it is possible to find the optimal control solution of the real system at the cost of changing a convex constrained optimisation to non-convex optimisation. Usually the main drawback is the time needed to find solutions, but given the system's sampling time, the computing time is small enough to let the solver find a solution. Suboptimal solutions are found due to the flatness of the gradient of the cost function, but this solutions are close enough to the optimal solution for the objective of this work and close enough to guarantee feasibility in the next time-step.

To guarantee the feasibility of the next time-stem the imposition of terminal conditions can be added to the control scheme. This addition increases the computational effort to conditions where the solution can not be found inside the sampling range of time, hence it has been discarded from the adopted solution.

3.2 Control-oriented Model

From (1), a control-oriented discretized model is obtained

$$x_1(k+1) = \left(-\frac{a_1}{A}\sqrt{2gx_1(k)}\right)T_s + \left(\frac{a_3}{A}\sqrt{2gx_3(k)} + \frac{\gamma_a}{A}\frac{u_1(k)}{3600}\right)T_s + x_1(k), \tag{2a}$$

$$x_2(k+1) = \left(-\frac{a_2}{A}\sqrt{2gx_2(k)}\right)T_s + \left(\frac{a_4}{A}\sqrt{2gx_4(k)} + \frac{\gamma_b}{A}\frac{u_2(k)}{3600}\right)T_s + x_2(k), \tag{2b}$$

$$x_3(k+1) = \left(-\frac{a_3}{A}\sqrt{2gx_3(k)}\right)T_s + \left(\frac{(1-\gamma_b)}{A}\frac{u_2(k)}{3600}\right)T_s + x_3(k), \tag{2c}$$

$$x_4(k+1) = \left(-\frac{a_4}{A}\sqrt{2gx_4(k)}\right)T_s + \left(\frac{(1-\gamma_a)}{A}\frac{u_1(k)}{3600}\right)T_s + x_4(k), \tag{2d}$$

where the state variables are the h_i tank water levels for $1 \leq i \leq 4$. Moreover, the control inputs are $u_1 \triangleq q_a$ and $u_2 \triangleq q_b$, corresponding to the two input flows to the upper tanks. Letter k determines the discrete-time variable.

3.3 System Constraints

The overall problem constraints are given in the CEA challenge document [1]. The bounding state constraints are defined as

$$0.2\,m \leq x_i \leq 1.2\,m, \quad i = 1, 2, 3, 4. \tag{3}$$

In addition to the state constraints, there is another set of hard constraints related to the input water flows that feed the upper level tanks

$$0\,m^3/h \leq u_z \leq 2.5\,m^3/h, \quad z = a, b. \tag{4}$$

3.4 Cost Function

The objective of the controller is to minimize the function over the control horizon. The function to minimize is $J(h, q, c, p)$, given by the problem statement of the CEA challenge

$$J(h, q, c, p) = (q_a^2 + cq_b^2) + p\frac{V_{min}}{A(h_1 + h_2)}. \tag{5}$$

To implement the NMPC algorithm the cost function expressed in (5) has to be discretized and expressed in state representation form

$$J(k) = (u_1(k)^2 + cu_2(k)^2) + p\frac{V_{min}}{A(x_1(k) + x_2(k))}. \tag{6}$$

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

The cost function is computed over a given prediction and control horizons (H_p and H_c).

3.5 NMPC Algorithm

Let

$$\mathbf{u}(k) \triangleq (u(0|k), \ldots, u(H_p - 1|k)) \tag{7}$$

be the sequence of control inputs over a prediction horizon H_p where there is also the dependence on the initial condition $x(0|k) \triangleq x_0$. The NMPC algorithm proposed to regulate the water levels in the four-tank system can be formulated as follows:

$$\min_{\mathbf{u}(k)\in\mathbb{R}^{m\times H_p}} \quad J(x_0, \mathbf{u}(k)), \tag{8}$$

subject to

- system model (2) over H_p,
- state constraints (3) over H_p,
- input constraints (4) over H_p,

It is useful to relax the state constraints, this leads to reduced computation time while it keeps the states in the admissible range of operation. Additional costs could be added to represent this relaxation of constraints but experiments showed it was not necessary to add this additional weights to the cost function.

To define the control horizon (H_p) it is necessary to take into account the sampling time and the dynamics of the system. If H_p is too small the controller does not produce a significant impact on the system due to the small optimization window, thus the cost of the control action is too big compared to the final effect. In consequence, H_p has to be at least big enough to be able to see significant results in the relevant outputs, corresponding to states x_1 and x_2. A critical issue in the election of H_p is the stability of the closed loop system, the values considered for H_p have never presented stability problems. Finally the control horizon (H_c) must be defined, the computation time is not critical and allows to use H_c equal to H_p. In table 1 the parameter configuration for the simulations are presented.

4 Simulation Results

The initial state for all simulations is $x_0 = (h_1, h_2, h_3, h_4) = (0.5955, 0.6616, 0.5384, 0.7682)$ in [m]. The simulations have been carried out using `fmincon` in MATLAB® R2011a (32 bits), running in a PC Intel® Core™ i7-3770 at 3.40GHz with 8GB of RAM.

4.1 Controller Setup

One of the advantages of NMPC algorithms is the high degree of configuration that they offer (control and prediction horizons, penalization terms, etc.). Table 1 shows the controller setup parameters and the computational effort for the simulation scenario proposed for the CEA competition.

Table 1: NMPC setup parameters.

Parameter	Variable	Value
Prediction horizon	H_p	120
Control horizon	H_c	120
Sampling time	T_m	5 s
Simulation time	T_{sim}	4800 s
Computing time	CPU_t	10 min
Av. optimization time (figure 9)	T_{opt}	0.58 s

In figure 2, a general representation of the closed-loop control scheme for the NMPC approach implementation is showed.

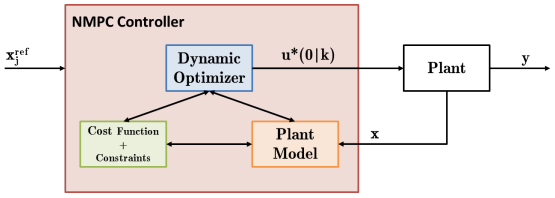


Figure 2: Closed-loop control scheme

4.2 Results and Discussion

The computing time for each of the simulations is around 10 minutes each time the algorithm runs to study 80 minutes of the behaviour of the system. The computing time is below the real response of the system, hence the adapted solution is adequate to be implemented in a real plant.

The behaviour of the water level of each tank versus the ideal trajectory planned by the reference generator is represented in figures 3, 4, 5 and 6. As it can be seen in previous figures, not always the real tank level arrives to the ideal trajectory with the same velocity. The prioritisation of the minimal cost of the trajectory over the reference tracking of the tank levels result in the shown water dynamical behaviour.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

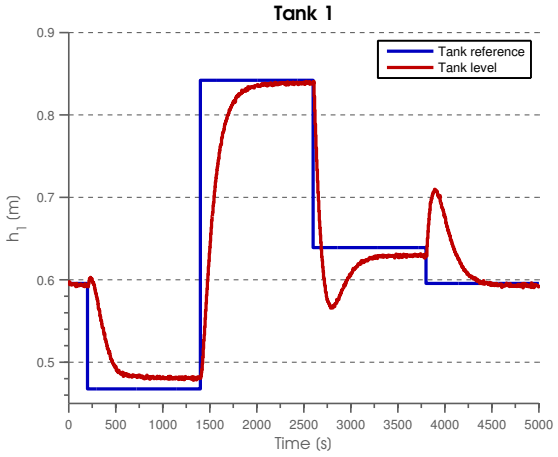


Figure 3: Tank 1 level

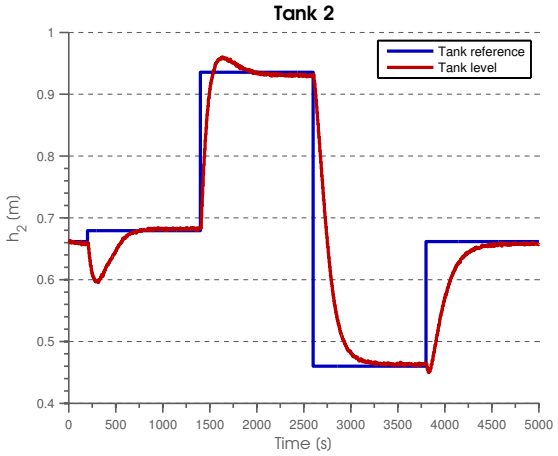


Figure 4: Tank 2 level

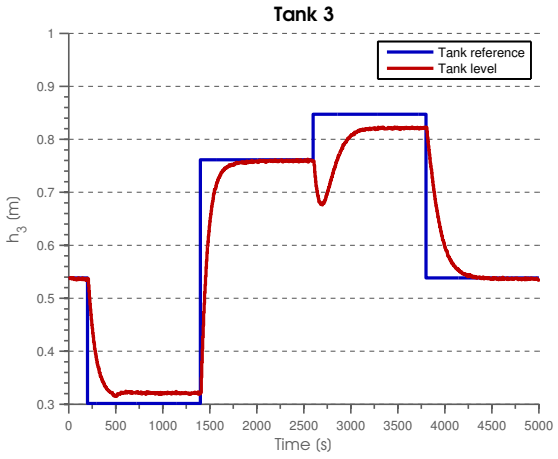


Figure 5: Tank 3 level

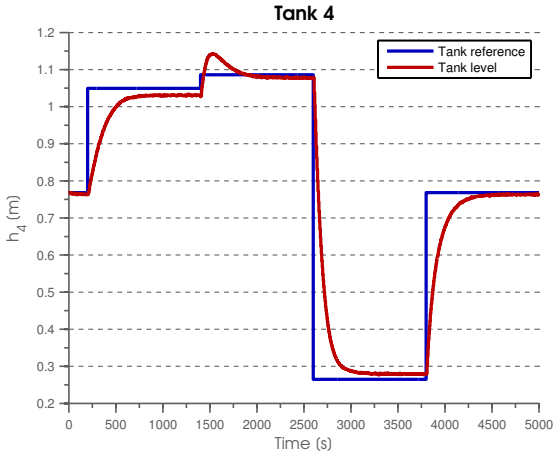


Figure 6: Tank 4 level

Water flows can also be represented. In figure 7, the behaviour of both q_a and q_b versus the ideal trajectories q_a^* and q_b^* are shown.

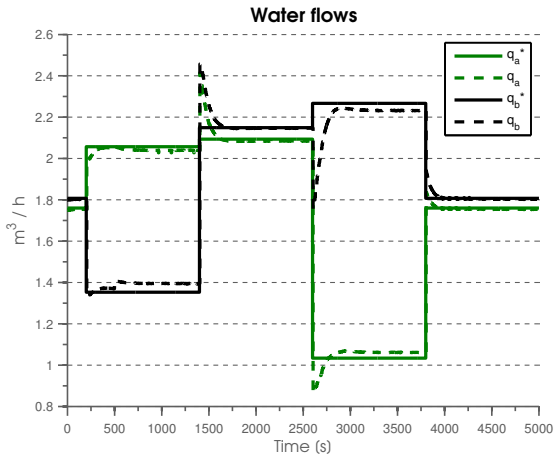


Figure 7: Water flows behaviour

The dynamical behaviour of the cost function is shown in figure 8 where it can be seen that at each change of the ideal trajectories, there is a variation of the cost. The cost function is returned to zero approximately in 300-400 seconds after the trajectory variation. Figure 8 shows the computation time at each simulation step during the case study.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

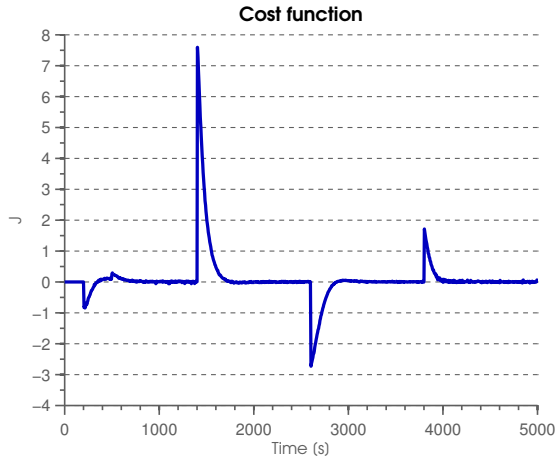


Figure 8: NMPC cost function

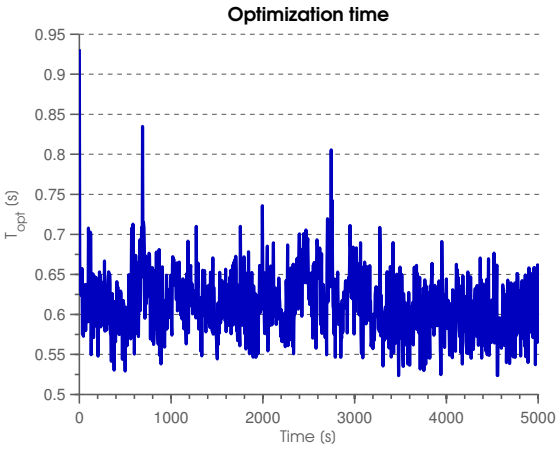


Figure 9: Optimization time at each simulation step

Finally, the representation of the ID performance index over time is included in figure 10. After the simulation is completed, a final ID value of 431.2 is obtained.

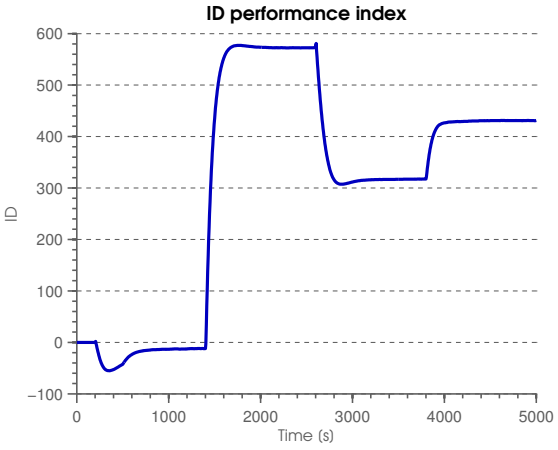


Figure 10: ID performance index value

5 Conclusions

A NMPC controller has been designed and implemented to be applied to the four-tanks system. The performance of the controller has been evaluated, obtaining low ID values in the simulation scenario proposed in the contest. The proposed controller minimizes a cost function that takes into account two different control objectives: the minimization of the energetic consumption of the plant and the maximization of the accumulated water volume in the lower deposits.

To implement the controller in the real plant, further tuning will have to be performed in situ to adjust the controller parameters in order to behave adequately taking into account real operation parameters and the possible disturbances that may appear. Moreover, the proposed optimizer function `fmincon` can be substituted and/or modified to improve the computation time by means of optimization methods that are more appropriate for the nonlinearities present in the studied case study.

Acknowledgements

We would like to express our deepest gratitude to our project advisor Dr. Ramón Costa, for his patient guidance, enthusiastic encouragement and useful critiques during the development of this work.

References

[1] Descripción de la Fase 1. URL: http://www.ceautomatica.es

[2] De Schutter, B., & van den Boom, T. J. (2004). MPC for continuous piecewise-affine systems. Systems & Control Letters, 52(3), 179-192.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

[3] Gatzke, E. P., Meadows, E. S., Wang, C., & Doyle Iii, F. J. (2000). Model based control of a four-tank system. Computers & Chemical Engineering, 24(2), 1503-1509.

[4] Grüne, L., & Pannek, J. (2011). Nonlinear Model Predictive Control (pp. 43-66). Springer London.

[5] Johansson, K. H. (2000). The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 8(3), 456-465.

[6] Khalil, H. K., & Grizzle, J. W. (2002). Nonlinear systems (Vol. 3). Upper Saddle River: Prentice hall.

[7] Maciejowski, J. M. (2002). Predictive control: with constraints. Pearson education.

[8] Mhaskar, P., El-Farra, N. H., & Christofides, P. D. (2005). Robust hybrid predictive control of nonlinear systems. Automatica, 41(2), 209-217.

[9] Nagy, Z. K., Mahn, B., Franke, R., & Allgöwer, F. (2007). Real-time implementation of nonlinear model predictive control of batch processes in an industrial framework. In Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control (pp. 465-472). Springer Berlin Heidelberg.

[10] Zavala, V. M., & Biegler, L. T. (2009). The advanced-step NMPC controller: Optimality, stability and robustness. Automatica, 45(1), 86-93.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Estudio de escenarios de uso para un robot social asistencial para enfermos de Alzheimer

Miguel A. Salichs
salichs@ing.uc3m.es

Esther Salichs
esalichs@ing.uc3m.es

Irene P. Encinar
ipencina@ing.uc3m.es

Álvaro Castro-González
acgonzal@ing.uc3m.es

María Malfaz
mmalfaz@ing.uc3m.es

Resumen

Los robots han comenzado a aplicarse a la asistencia de personas mayores y, en particular, en pacientes con algún tipo de demencia, mostrando que pueden mejorar la calidad de vida de estas personas. El objetivo del proyecto RobAlz es el diseño y desarrollo de un robot social asistencial para enfermos de Alzheimer y sus cuidadores, tanto en casa como en centros o residencias. El proyecto está dividido en tres fases: la definición de requisitos y funcionalidades, la construcción del robot y su evaluación con enfermos y cuidadores en entornos reales. En este trabajo se presentan los resultados de la primera fase del proyecto, durante la cual se mantuvieron un conjunto de reuniones con expertos en los temas relacionados con la enfermedad de Alzheimer y con expertos en robótica. En estas reuniones se discutieron cuatro áreas de aplicación para el robot: seguridad, entretenimiento, asistencia personal y estimulación; y se debatieron aspectos generales para su diseño. Como resultado de las reuniones, se obtuvieron una serie de escenarios de uso del robot que fueron aprobados por todos los integrantes de las reuniones. Estos escenarios constituyen la base para obtener los requisitos para el diseño del robot.

Palabras clave: *alzheimer, demencia, personas mayores, robot social asistencial, robot social.*

1. Introducción

Vivimos en una sociedad cada vez más anciana, a causa de la esperanza de vida cada vez más alta y, unido a este progresivo envejecimiento de la población, algunas enfermedades han ido adquiriendo mayor importancia dado que los casos que aparecen se han incrementado. Entre estas enfermedades se encuentran la demencia y en especial la enfermedad de Alzheimer (en adelante EA).

A falta de estudios epidemiológicos precisos, se estima que en España hay entre 500.000 y 800.000 pacientes con EA [1]. La EA se trata de un trastorno neurodegenerativo que se manifiesta como deterioro cognitivo y trastornos conductuales. A nivel bioquímico se producen tres grandes lesiones: placas seniles, degeneración neurofibrilar y pérdida de las conexiones neuronales y muerte neuronal. Todo ello, provoca una progresiva pérdida de memoria y de otras funciones cognitivas, como el lenguaje, habilidades motoras y la percepción, con síntomas también en la esfera conductual y psicológica, pérdida de autonomía y todo ello con una importante sobrecarga para la familia y el entorno social.

El Alzheimer no sólo afecta al paciente, sino que repercute en todo su entorno. La demencia va causando incapacidad progresiva y hace necesario la presencia de un cuidador. En España, lo más habitual es un modelo de ayuda informal. El cuidador principal es aquella persona que desde el primer momento se va a ocupar de la atención del paciente en mayor cantidad e intensidad de tiempo.

En este contexto es necesario tomar en cuenta el rápido desarrollo de las altas tecnologías que ha dado lugar a la creación de robots no sólo para las fábricas, sino también para nuestro entorno cotidiano, como sucede con hogares, oficinas y hospitales. Se espera que los robots sociales representen una nueva aplicación de la robótica, lo que está atrayendo a numerosos investigadores y empresas. Estos robots están diseñados para el entretenimiento, la comunicación (actividad social), la orientación, la educación, el bienestar, la psicoterapia y otros fines. No sólo son objeto de mediciones objetivas, sino también subjetivas en cuanto a su interacción con las personas, como por ejemplo, midiendo el grado de bienestar y de alegría que proporcionan.

El trabajo presentado forma parte del realizado para el proyecto RobAlz, el cual tiene como objetivo explorar las posibilidades de la robótica en el ámbito de la demencia y más concretamente, en el de la enfermedad de Alzheimer, intentando ayudar en cierta forma, no solo a los enfermos en sí, sino también a sus cuidadores. Este proyecto se lleva a cabo mediante la colaboración de la FAE (Funda-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

ción de Alzheimer de España) y la UC3M, siendo de suma importancia, ya que con ello, se ha conseguido un grupo de participantes de las distintas áreas necesarias para el desarrollo del proyecto. Lo que se plantea como novedoso en este proyecto, es que no sólo se pretende ayudar al enfermo en sí, sino que también se le da gran importancia al papel del cuidador, y por ello, se han tenido en cuenta aspectos para poderle aliviar cierta carga que conlleva estar cuidando a un enfermo de Alzheimer.

El proyecto RobAlz está dividido en tres fases:

1 Definición de los escenarios en los que el robot debe actuar.

2 Diseño y construcción del robot

3 Experimentos y evaluación del robot con enfermos de EA y sus cuidadores en su entorno doméstico.

En este paper se muestra parte de los resultados de la primera fase para la cual, se llevaron a cabo varias reuniones con distintos miembros de la FAE (Fundación Alzheimer España), cuidadores, terapeutas y expertos en robótica, para evaluar las funcionalidades, aspecto y sistema de interacción que debía tener el robot. Las áreas a tratar fueron seguridad, asistencia personal, entretenimiento y estimulación. Para cada área se definieron una serie de escenarios en los que el robot puede ayudar en la vida diaria de un enfermo de Alzheimer y así aliviar a su vez, la carga que debe soportar el cuidador.

La estrutura que se ha seguido para el paper es la siguiente: En la Sección 2 se presentan algunos de los estudios previos realizados, así como algunos de los robots que se han aplicado a la ayuda de ancianos afectados de algún tipo de demencia. En la Sección 3, se detalla el método utilizado para la realización de las reuniones. Seguidamente, la Sección 4 se presentan aquellos escenarios obtenidos de las reuniones. Finalmente, en la Sección 5, se realiza un análisis sobre los escenarios y su viabilidad, basándose en aspectos técnicos, psicológicos y sociales.

2. Trabajos previos

2.1. Estudios previos

El rápido desarrollo de la tecnología y el incremento de la población anciana han dado lugar a la realización de numerosos estudios sobre el efecto de los robots en personas de la tercera edad y a la creación de robots orientados a este sector de la población. En particular, algunos de estos trabajos se han centrado en estudiar cuál sería la apariencia preferida por las personas mayores para un robot destinado a la interacción con ellos.

En el estudio realizado por Wu et al. en el 2012 [2], se evaluaron las diversas reacciones que provocaban distintos tipos de robots. En la primera parte de la sesión se proponía a los participantes que hablaran sobre la percepción que tenían acerca de la robótica. Seguidamente, se les mostraba un total de 26 fotografías de distintos robots y un vídeo de robots en acción. Para finalizar, se les repartían 21 fotografías de distintos robots para que eligieran sus tres favoritos con el objetivo de que les asistieran en sus casas. La mayoría prefirieron robots que fueran discretos y pequeños, frente a los de igual tamaño que un humano. De igual forma, presentaron rechazo ante los robots concebidos para sustituir la presencia humana.

Continuando con esa línea, otros investigadores han analizado las posibles funcionalidades que debería tener un robot para asistir a personas mayores. Mast et al. [3] llevaron a cabo estudios en Alemania, Italia y España, para cuantificar la utilidad de ciertos servicios que puede ofrecer un robot a un anciano en su entorno doméstico. Para la realización del estudio contaron tanto con ancianos con cierta limitación como con cuidadores. A los participantes se les mostraban 25 posibles servicios que podía ofrecer el robot mediante dibujos, fotos o videos. Después, a través de un cuestionario, los participantes evaluaron cada servicio en una escala de cinco puntos. Entre los resultados que se obtuvieron de los ancianos, la asistencia en caso de emergencia fue el servicio con mejor puntuación, seguido de aquellos servicios para realizar tareas físicamente costosas para el anciano. Entre los servicios que se calificaron más negativamente se encuentran la realización de juegos a través del robot y que el robot sirva de compañía al anciano. Entre los cuidadores, la función de recordar tareas fue el que sacó mejores puntuaciones, seguida por las tareas de estimulación, detección de caídas y asistencia en caso de emergencia. La única que obtuvo puntuaciones negativas fue la asistencia del anciano para andar, y la función de hacer compañía al enfermo obtuvo una puntuación neutra. La diferencia de opiniones entre los ancianos y los cuidadores demuestran que ambas se deben tener en cuenta para la definición de un robot orientado a la tercera edad.

Frennert and Östlund reafirmaron esta idea en su publicación sobre las cuestiones importantes que se deben tener en cuenta para robots sociales orientados a ancianos [4]. Estos advierten sobre el papel general de los ancianos durante el desarrollo

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de robots para su asistencia: "Las personas mayores son definitivamente consideradas, pero no consultadas". Afirmaron que los asuntos que conciernen a los ancianos son diferentes de las ideas preconcebidas sobre sus necesidades. En consecuencia, proponen incluir ancianos desde el principio del proceso de diseño.

2.2. Robots aplicados a ancianos con demencia

De forma similar a los estudios, están emergiendo un gran número de robots orientados a ayudar a ancianos con cierto nivel de demencia (incluyendo el Alzheimer) en su vida diaria o mejorar su socialización. Estos robots presentan ciertas ventajas, como el rápido procesamiento de la información, no enferman ni se cansan, no experimentan estrés y, en ciertos aspectos, poseen un alto grado de exactitud. Dichos robots se pueden dividir en dos tipos. Por una parte se tienen aquellos cuya finalidad es servir, en cierta forma, de mascota al anciano. Sus principales objetivos son reducir el estrés y depresión del anciano, y mejorar su bienestar y socialización. Suelen ser exteriormente sencillos, y su aspecto puede ser entre animales conocidos, no conocidos y personajes o animales ficticios. El otro tipo de robots está más orientado a asistir al anciano en sus actividades cotidianas diarias, ya sea mediante estimulación cognitiva o física, asistencia física, entretenimiento y/o compañía, entre otros aspectos. En estos robots, no se suele dar tanta importancia a la apariencia del robot, sino que ésta viene dada según la funcionalidad que ofrece.

Dentro del primer grupo de robots, se encuentra *Paro*, un robot foca bebé desarrollado en Japón [5, 6] tanto como mascota como con fines terapéuticos. Su objetivo consiste en enriquecer la vida cotidiana y en mejorar las condiciones mentales de los ancianos reduciendo el estrés, promoviendo su socialización y mejorando su motivación. Según Wada [6], los robots mascota son capaces de proporcionar beneficios similares a los obtenidos con las terapias que utilizan animales, pero sin los cuidados que necesitan los de verdad.

Se han realizado numeroso estudios utilizando a Paro en diferentes centros especializados con ancianos con y sin demencia. Muchos de los pacientes han mostrado una mejora en sus niveles de estrés e interacción, no sólo con los cuidadores sino también con el resto de pacientes. Además, los cuidadores también redujeron sus niveles de estrés, ya que los pacientes necesitaban menos atención mientras estaban interactuando con el robot [5].

Otro robot terapéutico reciente es *Babyloid*, un bebé robot diseñado para ser cuidado por el anciano con demencia [7]. Su función es reducir el estrés y aumentar la motivación del paciente, dándole la oportunidad de cuidar de un "bebé" pero sin los riesgos que habría si éste fuera de verdad. Está diseñado para que parezca que es incapaz de hacer cualquier cosa por sí mismo.

Para medir su grado de aceptación, se realizó un estudio que comparaba las primeras impresiones que causaban los robots Paro y Babyloid. Los resultados obtenidos fueron bastante buenos para los dos robots, pero Paro superó a Babyloid en ciertos apartados, como el del movimiento, el cual es justificable ya que Babyloid tiene una movilidad muy limitada. En cuanto al bienestar que causaba, los ancianos se sentían tan responbles de Babyloid, que eso les creaba cierta angustia cuando se planteaban qué pasaría si le tenían que dejar sólo, o simplemente se veían incapaces de cuidarlo por el hecho de ser ancianos.

Por otro lado, existen otro tipo de robots orientados a la asistencia tanto en entornos domésticos. Este es el caso del proyecto *CompanionAble* [8], el cuál combina un robot móvil con un sistema domótico. El robot *Hector* ofrece distintos servicios como agenda, videollamada y programas de psicoestimulación. A su vez, la casa domótica proporciona otras funcionalidades como la posibilidad de vigilar la posición del paciente o de detectar si se ha caído. Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con CompanionAble muestras que no sólo las personas con demencia obtienen beneficios, sino que también los obtienen sus cuidadores los cuales se sintieron en cierta forma aliviados al ver reducida su carga.

Aunque existen diversos robots creados especialmente para ancianos, existen otros tantos que aunque su objetivo principal no está orientado a este sector de la población en concreto, han sido utilizados como objeto de estudio para evaluar el uso de robots en dicho sector. Este es el caso del estudio presentado por Kanamori et al. [5], en el cual se utiliza al robot comercial *Aibo*. En dicho estudio se realiza un programa de terapia similar a aquellas en las que se utilizan animales dado la similitud de Aibo con un perro. Los resultados mostrados fueron que se redujo el estrés y la sensación de soledad de los ancianos después de varias sensiones en un centro de día. Dado que Aibo no está diseñado para la terapia, no fomentó lo suficiente la interacción y requirió una mayor intervención por parte del terapeuta.

Sin embargo, Martín et al. [9] consiguieron utilizar satisfactoriamente a *Nao*, un robot humanoide programable y autónomo, como una herramienta para la psicoestimulación de pacientes con demencia. Al ser un humanoide, permite utilizarlo para

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

las sesiones de ejercicios físicos, ya que se pueden simular movimientos similares a los que deben realizar los ancianos. En este caso, las sesiones terapéuticas fueron diseñadas y controladas por terapeutas profesionales. Se realizaron cuatro tipo de sesiones: cuentacuentos, musicoterapia, fisioterapia y estimulación del lenguaje y lógica. Los resultados obtenidos, demostraron que el robot había capturado bastante la atención de los pacientes por su apariencia de humanoide, sus movimientos y su capacidad musical. Además, se mostró que algunos de los síntomas de los pacientes mejoraron en comparación a los resultados obtenidos usando métodos clásicos.

En muchos de los estudios previamente mencionados, los robots son utilizados para mejorar la calidad de vida del paciente o para intentar ralentizar el desarrollo de la enfermedad. Esto da lugar a que los beneficios para los cuidadores pasen a un segundo plano. El trabajo que se presenta en este paper se diferencia en los expuestos anteriormente, en que nuestra intención desde un inicio ha sido no sólo mejorar la calidad de vida del paciente, sino también la del cuidador. Por tanto, uno de los desafíos del proyecto *RobAlz* es proporcionar un conjunto de funcionalidades y escenarios con el objetivo de satisfacer las necesidades tanto de los pacientes como de los cuidadores.

3. Reuniones

Como se menciona en la Sección 1, este paper esta centrado en la primera fase del proyecto *RobAlz* El objetivo de esta fase es definir la funcionalidad y sistema de interacción de un nuevo SAR desarrollado con el propósito de ayudar a pacientes de Alzheimer, así como también a sus cuidadores, ya sea en sus casa o en centros especializados.

Para la primera fase, se llevaron a cabo varias reuniones durante cinco meses con los distintos participantes del proyecto para evaluar las funcionalidades y el aspecto que debía tener el robot, definiendo los escenarios concretos en los que estas funciones se pueden desarrollar. Cada uno de los participantes contribuyó con su punto de vista sobre cómo un robot puede ayudar al enfermo y a su cuidador. Entre dichos participantes se incluyeron expertos de las diferentes áreas relacionadas con la EA y los robots sociales: dos miembros de *FAE*, dos psicólogos, dos terapeutas, un cuidador directo (marido), cuatro cuidadores indirectos (familia del enfermo) y seis expertos en el ámbito de la robótica de la Universidad CarlosIII de Madrid. Involucrando a los distintos expertos desde el primer momento, sobre todo se consigue plantear las diversas situaciones desde distintas perspectivas del enfermo de Alzheimer, su entorno y su día a día, para así poder desarrollar un proyecto lo más completo posible.

El método que se siguió para llevar a cabo las reuniones fue el siguiente:

1. Primeramente, se definía el área o tema a tratar durante la reunión: seguridad, asistencia personal, entretenimiento y estimulación del enfermo.
2. Durante la reunión se producía una lluvia de ideas sobre las distintas funcionalidades que puede tener el robot para el tema en concreto a tratar.
3. Las distintas ideas que se fueron exponiendo, se resumían para posteriormente definir los escenarios posibles de uso del robot, así como ciertos requisitos que debía tener el diseño.
4. Finalmente, los escenarios fueron evaluados, revisados y aceptados por todos los participantes en la siguiente reunión.

Una vez definidos los escenarios, los expertos en robótica realizaron un análisis de la viabilidad de cada uno de ellos, basándose en aspectos técnicos, psicológicos y sociales. Finalmente, este análisis servirá para seleccionar un conjunto de escenarios que conformen la base para la definición de los requisitos técnicos para un primer prototipo de SAR.

4. Escenarios

A continuación, se presentan los distintos escenarios recopilados de dichas reuniones.

4.0.1. Seguridad

Estos escenarios están relacionados con la seguridad del paciente.

- **Vigilancia con robot estático:** Vigilancia de la posición del enfermo en una zona de la casa por parte de un robot situado en una posición estática. El robot sólo puede vigilar una habitación en el momento, pero puede ser movido a un conjunto de puntos predefinidos de los distintos sitios de la casa. Por ejemplo, se puede colocar en la mesilla para detectar si el enfermo se va de la habitación durante la noche. También se puede colocar en sitios que conlleven un peligro para el paciente, como la cocina. El cuidador en este caso, puede definir dichas áreas como peligrosas. En el caso de que el robot detecte que el enfermo se dirige hacia una de esas áreas, el robot le intenta

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

persuadir con un mensaje acústico, del tipo: "No me dejes solo" o "Quiero que te acerques más a mí", aparte de advertir al cuidador mediante una llamada o mensaje de texto.

- **Vigilancia con robot móvil:** En este escenario, el robot sigue al enfermo por toda la casa de manera que éste permanezca todo el tiempo vigilado. Si el enfermo se acerca a alguna zona peligrosa de la casa o si ocurre algún incidente (caída, etc.), el robot emite una alarma y/o envía un mensaje al cuidador.
- **Vigilancia con robot interfaz:** Vigilancia de toda la casa utilizando sistemas domóticos de manera que se tenga registro constante de dónde se encuentra el enfermo y, eventualmente, de su actividad. El robot, en este caso, actuaría como una interfaz amigable para el cuidador, que le informa del enfermo en cada momento. En el caso de que el enfermo realice alguna actividad o se acerque a alguna zona de la casa considerada como peligrosa, el robot debe avisar mediante un mensaje o alarma.
- **Vigilancia con robot interfaz GPS:** El robot realizar el *tracking* del paciente cuando se encuentra fuera de casa a través de un sistema GPS. Para ello, el enfermo debe llevar un sensor, ya sea como pulsera o similar, para así poder realizar su *tracking* y proveer de esa información al cuidador. De esta manera, el robot le puede avisar si el enfermo lleva mucho tiempo en el mismo sitio, si ha salido de una cierta zona de seguridad marcada previamente por el cuidador, etc. Además, si el enfermo ha ido a dar una vuelta o a hacer un recado y tarda más tiempo del previsto, el robot puede avisar al cuidador de su situación dándole la posición del enfermo.

4.0.2. Asistencia personal

Los siguientes escenarios describen situaciones donde el robot ayuda al enfermo en sus actividades diarias. En este caso, el cuidador provee toda la información necesaria para llevar a cabo dichas actividades, así como, el mismo cuidador debe ser el responsable de la supervisión de ellas.

- **Ubicación de objetos por medio de robot estático:** El robot indica al enfermo dónde se sitúan los diversos objetos en el espacio, pero sin moverse. El enfermo pregunta al robot dónde se encuentra un objeto en concreto y el robot, que se encuentra con el enfermo, le indica cómo llegar al objeto mediante voz e imágenes mostradas en una pantalla. Las instrucciones deben ser sencillas para poderle guiar en el espacio. No sólo hay que indicar dónde están los objetos sino cómo se puede llegar a ellos, dándole las indicaciones para llegar a la habitación y lo que tiene que hacer en ella. Para ello, es importante insistir al enfermo en que deje los objetos siempre en el mismo sitio (marcar rutina). Un posible ejercicio de estimulación sería preguntar al enfermo periódicamente dónde están determinados objetos al azar sin que el enfermo los necesite en el momento.
- **Ubicación de objetos por medio de robot móvil:** Este escenario es similar al anterior, pero en este caso, el robot acompaña al enfermo hasta el lugar donde se sitúa dicho objeto por el que ha preguntado. Para ello, también se ayuda de voz para ir dando instrucciones complementarias al enfermo.
- **Enfermo solo en casa:** El objetivo es tranquilizar al enfermo en momentos en los que se queda solo en la casa, informándole de dónde está el cuidador y poniéndole en contacto con él, en el caso que sea necesario. Cuando el cuidador necesita salir de casa y el enfermo se encuentra solo en ella, se puede poner nervioso. En este caso, el robot debe intentar tranquilizarle ya sea diciendo frases que le calmen, reproduciendo mensajes que el cuidador haya grabado previamente o poniéndole en contacto con él mediante una llamada o videollamada telefónica, utilizando al robot como terminal telefónico.
- **Recordar actividades y efemérides:** El robot puede recordar al enfermo lo que hay que hacer en los distintos momentos del día, marcados por una rutina. Dentro de estas actividades, también se encontraría la hora de las medicinas, que a su vez serviría de recordatorio al propio cuidador. Además, en el caso que el enfermo no sepa cómo realizar una actividad, el robot se lo puede recordar mediante instrucciones de voz e imágenes, pero será el cuidador el responsable de supervisar que la actividad se realice correctamente. También se puede encargar de recordarle fechas señaladas como cumpleaños de familiares, santos, festivos...
- **Ubicación del enfermo en el entorno:** Indicar al enfermo, mediante instrucciones sencillas, dónde se encuentra en ese momento. Los enfermos de Alzheimer frecuentemente se desorientan en el espacio y suelen preguntar dónde se encuentran. Para ayudarle, el robot puede indicarle dónde está en el caso de que el

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

enfermo le pregunte. Las instrucciones son del tipo "Estás en Madrid, en el salón de tu casa". Como algo complementario, el robot puede indicar al enfermo para qué sirve la habitación donde se encuentra.

- **Tomar decisiones sencillas:** Poder tomar una decisión por el enfermo ante momentos de duda y controversia, como por ejemplo, qué ropa vestir en función del clima. El robot explica al enfermo, básicamente por voz, el resultado de la decisión. Esto se puede hacer cuándo el enfermo le pregunte al robot, aunque también el robot lo podría indicar a la hora de explicar la actividad a realizar. Por ejemplo, si hay que vestirse, el robot ya podría decir lo que hay ponerse, e incluso, mostrar alguna imagen en el caso de tener pantalla. De esta forma, el enfermo no llegaría a encontrarse en el momento de duda y se podrían evitar situaciones de ansiedad.
- **Responder preguntas frecuentes** Poder responder preguntas sencillas que realice el enfermo como "¿qué hora es?", "¿Qué tiempo hace?"... De esta forma, puede aliviar gran carga al cuidador ya que el robot no se "cansa" de responder siempre a la misma pregunta.

4.0.3. Entretenimiento:

La idea de estos escenarios es que el robot tiene una colección de actividades para entretener al paciente. Existe la posibilidad de personalizar o adaptar el comportamiento del robot con la ayuda del cuidador o de los familiares, los cuales proveen información acerca de la vida del paciente. Durante su uso diario, el robot puede ser programado para un período de tiempo concreto de forma que se combinen las distintas actividades para mantener al paciente lo más entretenido posible.

- **Cuenta-cuentos:** En este escenario, el robot posee una colección de historias, curiosidades, poemas, hechos o eventos de la vida del paciente. Los cuidadores pueden ajustar las historias o cuentos que el robot le va a contar al enfermo (una primera aproximación de esta idea se presentó en [10]). Esto se podría ir haciendo dinámicamente: tener un repertorio y que el robot lleve un registro de qué temas le han ido gustando más al enfermo (por ejemplo, hacer un informe semanal), de tal forma que el cuidador o el técnico pueda ir programando las historias favoritas del enfermo.
- **Escucha activa del robot:** Incitar al enfermo a hablar de sus temas favoritos mediante preguntas, palabras de seguimiento, de forma que parezca una escucha activa por parte del robot. El robot tendría algunos temas sobre los que preguntar al enfermo: historias de su vida, sobre su familia, su empleo, temas que le gusten, etc. Podría iniciar y mantener la conversación con latiguillos como "cuéntame la historia de tu mujer...", "¿ah sí?", "qué interesante", etc. El robot tendría que detectar si el enfermo se queda callado y volver a preguntar. También se podrían incluir expresiones o gestos en el robot que hicieran parecer que está atento y que está entendiendo lo que el enfermo le cuenta. De esta manera, el enfermo se siente escuchado y percibe que se interesan por él.
- **Conversación bilateral entre el robot y el enfermo:** Conversación bidireccional entre el enfermo y el robot sobre temas de conversación prefijados. El robot debe dar la sensación de que está entendiendo al enfermo y siguiendo la conversación como una persona lo haría. Aparte del objetivo de entretenimiento, también se persigue que el enfermo se sienta escuchado y que se interesan por él.
- **Juegos:** En este escenario se pretende mantener entretenido al enfermo durante un determinado período de tiempo mediante diferentes juegos de voz (sin tablero) como, por ejemplo, juegos de reconocer objetos o personajes. Existe un repertorio de posibles juegos y el cuidador puede programar el robot para que entretenga al enfermo con una secuencia de ellos, así como también puede programar la duración de cada juego. El tipo de juegos depende de las preferencias de cada enfermo, las cuales conoce su cuidador. Algunos juegos pueden ser personalizados, como por ejemplo, reconocer objetos que sean cotidianos en su entorno.
- **Contar noticias:** Contar noticias de actualidad al enfermo según la temática que sea de su interés: deportes, actualidad, cotilleo, etc. Al igual que en el caso de los juegos, existe un gran abanico de posibilidades, ya que el robot puede tomar las noticias de Internet. De la misma forma que con los juegos, el cuidador puede elegir la duración de esta actividad, así como la temática de las noticias. Según el tipo de enfermo, las noticias se pueden mostrar visualmente en una pantalla o ser narradas.
- **Reproductor multimedia:** Entretener al enfermo con diferente contenido multimedia, ya sea reproduciendo sus programas de televisión y de radio favoritos, independientemente de la hora de emisión de los mismos,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

canciones de la época del enfermo a petición suya, acontecimientos históricos, como pueda ser un partido de fútbol de su juventud, y fotos o vídeos caseros de eventos familiares. El contenido multimedia se puede reproducir a demanda del enfermo o si el cuidador programa el robot para que vaya reproduciendo los diferentes contenidos.

- **Robot afectivo:** Crear un vínculo afectivo entre el robot y el enfermo, que éste se sienta querido y también necesitado. Para generar el vínculo, el robot tendría que tener la posibilidad, por una parte, de poder decir cosas bonitas al enfermo, como lo guapo que está, lo mucho que le quiere, etc. Por otra parte, el robot podría tener necesidades, para que el enfermo se sintiera responsable de él, para que se sienta útil. Por ejemplo, el robot puede necesitar caricias o que de alguna forma se le dé de comer (algo como los "Tamagotchi"). De cara a este escenario es muy importante el aspecto del robot, algo que genere ternura, como una mascota.

4.0.4. Estimulación

Estos escenarios no se han definido en detalle en una primera fase dado que, para ello, se necesita de especialistas en dicho campo y un robot fiable, para que se pueda probar con él un programa de estimulación sin la necesaria supervisión de un profesional. Además, el estudio de las ventajas que puede conllevar dicho programa sería a largo plazo y se debería de hacer con un número considerable de usuarios para poder sacar resultados concluyentes. Por no disponer de ese número y por motivos técnicos, se ha decidido dejar este tema para una fase más avanzada del proyecto.

Sin embargo, como una primera aproximación se tienen los siguientes dos escenarios:

- **Ejercicios de estimulación física:** El robot ayuda al enfermo a realizar ejercicios físicos. Estos ejercicios deben ser diseñados, adaptados y supervisados continuamente por un profesional especializado en el tema.

- **Ejercicios de psicoestimulación:** En este escenario, el robot dispone de una colección de ejercicios de psicoestimulación y ayuda al enfermo a realizarlos. Estos ejercicios deben ser diseñados, adaptados y supervisados continuamente por un profesional especializado en el tema.

5. Conclusiones

En la sección anterior se han presentado un conjunto de escenarios para un robot diseñado para pacientes de Alzheimer y sus cuidadores. Dichos escenarios son el resultado de las reuniones realizadas con diversos expertos, cada uno de los cuales pudo contribuir con su experiencia y sus conocimientos en el campo.

Aun así, no todos los escenarios son realizables, ya sea porque no son convenientes del todo para el enfermo o porque la tecnología actual no permite su realización, por lo menos, sin que exista un trabajo demasiado arduo para ello y con tiempo del que no se dispone, sobre todo para un primer prototipo. A continuación, se comentan los escenarios que pueden presentar dichas dificultades:

En relación a los escenarios donde el robot es móvil (*Vigilancia con robot móvil*, y *Ubicación de objetos por medio de robot móvil*), el problema se encuentra en que el enfermo se puede sentir agobiado porque le siga a todas partes. Se puede sentir perseguido y eso puede hacer que no esté a gusto con el robot. Además, hay que considerar los aspectos de carácter ético, como que el robot le esté vigilando en sitios donde el enfermo debe tener privacidad, como el cuarto de baño. A ello se le suma la posibilidad de que pueda suponerle un obstáculo al enfermo y pueda tropezar con el robot. Desde el punto de vista técnico, el robot presenta la limitación ante problemas como abrir puertas o subir/bajar por escaleras. Esto hace que se limite la vigilancia sobre el enfermo y por tanto su eficacia. Por ello, se ha decidido utilizar un robot que fuera fijo, pero que pese poco y se pueda transportar con cierta facilidad en el caso necesario.

En los escenarios en los que el robot actúa como interfaz (*Vigilancia con robot interfaz* y *Vigilancia con robot interfaz GPS*), el papel del propio robot no está del todo determinado. La funcionalidad que se presenta, realmente se puede implementar con un sistema domótico en la casa y con un sistema GPS de seguimiento. En el caso del sistema domótico, el problema es que hay que instalar sensores por toda la casa y acondicionarla, lo cual plantea un gasto considerable y una variación del entorno del enfermo. En el caso del GPS, el enfermo debe llevar un sensor, el cual puede que le resulte incómodo y en momentos de ansiedad, incluso puede quitárselo aun sin darse cuenta de ello.

En cuanto a la conversación entre el robot y el enfermo, en estos momentos, los sistemas de diálogo que existen no permiten mantener conversaciones reales, pero como se ha comentado en el propio es-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

cenario (*Conversación bilateral entre el robot y el enfermo*), lo que sí que se puede hacer es emular el diálogo con simples frases. Esto, puede decepcionar al enfermo ya que con ello, puede destruir las expectativas que se tienen sobre el robot.

Para el escenario del *Enfermo solo en casa*, se presenta la limitación de saber detectar cuándo el enfermo tiene ansiedad a través de sistemas de percepción. Aun así, la opción de poder realizar una videollamada es posible de incorporar al robot. Otra limitación del robot es la incapacidad de reconocer si ciertas acciones se han hecho correctamente o no. Esto pasa con los escenarios de asistencia personal, en los que el robot dice dónde está un objeto o lo que posteriormente debe hacer el enfermo. El robot no puede saber si una actividad se ha hecho correctamente, sobre todo si se tiene que realizar en otro cuarto de la casa. Por ello, en esos casos, el cuidador debe ser el supervisor de la actividad.

En el caso del *Robot afectivo* se debe tener bastante cuidado con el tema de crear una necesidad para que el enfermo le atienda. Puede ocurrir que el enfermo intente de continuo cuidarle, así como sentirse decaído o ansioso si no consigue saciar dicha necesidad. Además, se puede dar el caso de que el enfermo tenga tal adicción, que rechace el resto de relaciones sociales.

Finalmente, este análisis servirá para seleccionar unos primeros escenarios en función de su viabilidad de cara a construir un primer prototipo robótico (segunda fase del proyecto RobAlz). Este prototipo permitirá la realización de unas pruebas con enfermos y cuidadores en entornos reales (tercera fase del proyecto), que servirán para determinar la verdadera utilidad de los escenarios presentados en este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Fundación Alzheimer España (FAE) y los fondos provistos por el Gobierno de España a través del proyecto "Aplicaciones de los robots sociales" DPI2011-26980 del Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

[1] Pwc and Lilly, "Estado del arte de la enfermedad de Alzheimer en España," Madrid, Tech. Rep., 2013.

[2] Y.-H. Wu, C. Fassert, and A.-S. Rigaud, "Designing robots for the elderly: appearance issue and beyond." *Archives of gerontology and geriatrics*, vol. 54, no. 1, pp. 121–6, 2012.

[3] M. Mast, M. Burmester, K. Kruger, S. Fatikow, G. Arbeiter, B. Graf, G. Kronreif, L. Pigini, D. Facal, and R. Qiu, "User-Centered Design of a Dynamic-Autonomy Remote Interaction Concept for Manipulation-Capable Robots to Assist Elderly People in the Home," *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 1, no. 1, pp. 96–118, Aug. 2012.

[4] S. Frennert and B. Östlund, "Review: Seven matters of concern of social robots and older people," *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 2, pp. 299–310, Apr. 2014.

[5] T. Shibata and K. Wada, "Robot therapy: a new approach for mental healthcare of the elderly - a mini-review." *Gerontology*, vol. 57, no. 4, pp. 378–86, Jan. 2011.

[6] K. Wada, T. Shibatal, T. Musha, and S. Kimura, "Effects of Robot Therapy for Demented Patients Evaluated by EEG," in *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1552 – 1557.

[7] Y. Furuta, M. Kanoh, T. Shimizu, M. Shimizu, and T. Nakamura, "Subjective evaluation of use of Babyloid for doll therapy," in *2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Brisbane, QLD: Ieee, Jun. 2012, pp. 1–4.

[8] H.-M. G. Ch. Schroeter, S. Mueller, M. Volkhardt, E. Einhorn, C. Huijnen, H. van den Heuvel, A. van Berlo, A. Bley, "Realization and User Evaluation of a Companion Robot for People with Mild Cognitive Impairments," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, no. Icra, Karlsruhe, Germany, 2013, pp. 1145–1151.

[9] P. Martín, Francisco; E. Agüero, Carlos; Cañas, Jose M.; Valenti, Meritxell; Martínez-Martín, "Robotherapy with Dementia Patients," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, p. 1, 2013.

[10] A. Ramey, J. F. Gorostiza, and M. A. Salichs, "A Social Robot as an Aloud Reader: Putting together Recognition and Synthesis of Voice and Gestures for HRI Experimentation," in *HRI 2012*, Boston, MA, 2012.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

EXTRUSIÓN MULTIFILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D EN COLOR

Víctor Andueza García
C/ Vivaldi 28, 29680 Estepona, vandueza13@gmail.com

Jesús Manuel Gómez de Gabriel
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial Málaga, jesus.gomez@uma.es

Resumen

En este artículo se explica el proyecto de mismo nombre donde se recoge el diseño, construcción, programación y experimentación de un extrusor multifilamento para realizar impresiones 3D en color. Se detallan de forma resumida cada uno de los procesos que ha llevado el proyecto hasta su finalización. A través de las explicaciones que se muestran en este artículo se pretende difundir el desarrollo de este elemento dentro de la tecnología de la impresión 3D, tan conocida en los últimos años.

1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas de prototipado rápido o impresoras 3D son, sin duda, una de las tecnologías más emergente en los últimos años en cuanto a fabricación de prototipos o pequeñas piezas. La impresión 3D está suponiendo toda una revolución en muchos ámbitos sociales y tecnológicos. Desde industrias de todo tipo, pasando por centros médicos de diagnóstico, hasta particulares han comenzado a popularizar la impresión 3D debido a las grandes prestaciones que presenta. El simple hecho de poder obtener un modelo similar de cualquier tipo de diseño, pieza u objeto, facilita notablemente los procesos de producción, estudio o investigación.

El funcionamiento básico de la impresión 3D es simple. Consiste en la deposición de finos filamentos de plástico (u otros materiales) formando una superficie plana con una forma determinada. La composición de muchas superficies como esa forman una figura sólida de material que reproduce el modelo introducido previamente mediante programa de CAD. La figura podrá tener detalles de diseño tan precisos como fino sea el filamento que se deposita en cada capa, lo que permite producir una gran cantidad de formas.

En la actualidad, la impresión 3D está en continua evolución ya que existe una gran comunidad de hardware y software libre y varias casas comerciales introduciendo novedades constantemente. Hay gran variedad de modelos y tipos de impresoras 3d. Existen diferentes configuraciones de movimiento de la herramienta, tales como manipuladores delta, brazos robóticos o máquinas de control numérico de tres ejes. También existen diferentes modificaciones de las principales piezas de la impresora, tales como soportes, camas calentadoras (superficie sobre la que se imprime) o extrusores.

El extrusor, una de las principales piezas de una impresora 3D, es la parte que se encarga de reducir la sección del filamento de plástico calentándolo y obligándolo a pasar por una boquilla de fina sección. Existe gran variedad de extrusores con novedades constantes en cuanto a la mejora de su funcionamiento. También existen extrusores de doble cabezal, para imprimir en dos materiales diferentes, lo que permite realizar piezas de dos colores o piezas con soportes de material soluble para realización de formas complicadas. Aunque menos avanzado en su desarrollo, existen también algunos prototipos de extrusores de mezcla de filamentos de colores para impresión en color, sin demasiado éxito hasta el momento [11] [12].

El presente artículo trata de explicar resumidamente el proyecto de mismo nombre [1] donde se desarrolla el diseño, fabricación y obtención de resultados de interés de un extrusor de mezcla de filamentos con el objetivo de ser implantado en la impresión 3D.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Tanto en el proceso de diseño de un producto, como en la realización de un prototipo, como en la fabricación de un objeto existe una variable fundamental en cuando al resultado esperado, que condiciona tanto impresiones o gustos, como resultados. Esta variable es el color que tiene el diseño, el prototipo o el producto fabricado en su superficie. En un proceso de estas características es

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

tan importante la forma que tenga el producto como el color o los colores que tenga.

Todas las tecnologías que tienen cierta relación con la visión del sujeto, tales como impresión, reproducción de imágenes o escritura, se han visto en la necesidad de implantar el color en algún momento de su historia. La necesidad de mejorar la percepción de la imagen o de detallar partes de la misma, va ligada a la implantación del color en esa tecnología. Del mismo modo que en un momento de la historia de la impresión en papel se empezaron a introducir colores para mejorar la visión de las imágenes, la impresión 3D necesita del color para completar las formas e introducir detalles.

El proceso de extrusión en las impresoras 3D permite realizar finos filamentos de una amplia gama de materiales con distintas propiedades o de distintos colores. Es posible realizar piezas de cualquier color, mediante la extrusión de un filamento que sea de ese color. El principal inconveniente es que el color con el que se alimente el material es el color que tendrá la pieza.

Puesto que comienza a surgir la necesidad de reproducir detalles, letras o diferentes colores dentro de la impresión 3D, empieza a surgir también la necesidad de realizar cambios de color, degradados o composiciones de diferentes colores según el espacio. Mediante la extrusión unifilar es imposible realizar este tipo de acciones, por lo tanto parece necesario comenzar una línea de desarrollo de impresión en color que permita en un futuro realizar piezas con diferentes colores, con detalles en la superficie e incluso realismo en la impresión del prototipo deseado.

En el proyecto realizado se abordó el comienzo de la extrusión multifilamento, planteando una base para el desarrollo futuro de la impresión en color. El objetivo de dicho proyecto no era realizar una impresión en color completamente funcional, sino plantear los primeros diseños, construcciones y pruebas que permitan encauzar correctamente el camino a seguir.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal que se propone en este proyecto es el diseño, la fabricación y la realización de pruebas de un extrusor multifilamento para una posible futura implantación en impresión 3D que permita realizar mezclas y cambios de color mediante una única salida de material.

Para cumplir dicho objetivo principal, se requiere de diferentes objetivos secundarios o fases que se detallan a continuación:

Diseñar y construir un sistema de extrusión capaz de realizar composiciones de color según diferentes sistemas cromáticos. Para ello, el sistema de extrusión sigue unas solicitaciones mecánicas, de temperatura y de forma determinadas.

Planificar e implantar el sistema electrónico de control y el software de control, que en conjunto realizan las tareas de alimentación de material al sistema, control de temperatura, codificación cromática e interactuación con el usuario.

Realizar una serie de experimentos de los cuales se obtienen muestras de color de las impresiones realizadas, mediciones de color de dichas muestras y otros datos de utilidad.

2 DISEÑO DEL SISTEMA CROMÁTICO

Para el desarrollo del diseño del extrusor multifilamento objeto de estudio es necesario prever uno o varios sistemas cromáticos que gobiernen el funcionamiento del mismo. Por lo tanto, es esencial analizar las formas posibles de impresión en cuanto al color se refiere, ya que las decisiones de diseño y control van en función de las conclusiones que en este apartado se obtienen.

A partir de una interfaz de usuario, utilizada para el desarrollo experimental del proyecto, se solicitan consignas de color en diferentes sistemas cromáticos. Partiendo de una síntesis aditiva, como es el modelo RGB, se realiza una transformación software a los distintos sistemas cromáticos de estudio y experimentación: Escala de Grises, CMY, CMYK y CMYKW [9], como se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Esquema de selección de color

Por otra parte, al tratarse de una deposición de filamentos sólidos sobre una superficie que no aporta cualidades cromáticas alguna, es necesario tener en cuenta un control de la saturación del color. Del mismo modo que una superficie de impresión convencional, como puede ser el papel, añade una variable que acerca o aleja un color en concreto del blanco, en la impresión 3D en color hay que tener en cuenta una variable, en este caso el color blanco, que produzca el mismo efecto.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tanto el sistema Escala de Grises, como el CMY, como el CMYK son comúnmente utilizados en la impresión convencional. El primero de ellos realiza una mezcla entre el blanco y negro (en el caso de la impresión 3D, con dos variables, tal como se comentó anteriormente) para obtener cualquier color del espacio de esta escala. Tanto el CMY como el CMYK son sistemas basados en los mismos principios de obtención de colores del espacio entre tres colores primarios (cian, magenta y amarillo), siendo un sistema de síntesis sustractiva, complementario al RGB de síntesis aditiva. La salvedad que existe entre el CMY y el CMYK es la obtención de distintos valores de brillo para un matiz en concreto. Debido a distintas propiedades de la composición de los tintes, la obtención del negro puro es casi imposible de obtener mediante la composición de las variables CMY, por lo tanto se añade una cuarta variable que actúa en proporción para modificar la variable de brillo de la mezcla.

A diferencia de los sistemas cromáticos cuyo diseño es específico para impresión convencional, un sistema de impresión sólida como este ha de contar con una variable saturación, tal como anteriormente se comentó. El sistema CMYKW se basa en la representación no cartesiana del espacio RGB, el espacio HSV (H: matiz, S: saturación, V: valor o brillo), con el cual se puede realizar un control y una transformación intuitivos. Así pues la composición de las variables CMY forman cualquier color del círculo cromático, la variable K desplaza el matiz en brillo y la variable W en saturación. En la Figura 2 y 3 se representa lo anteriormente descrito.

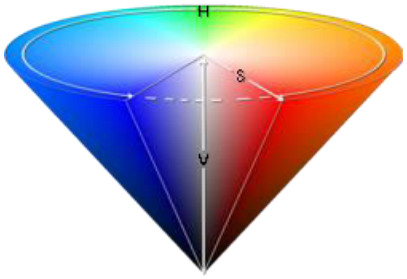


Figura 2: Cono de representación HSV

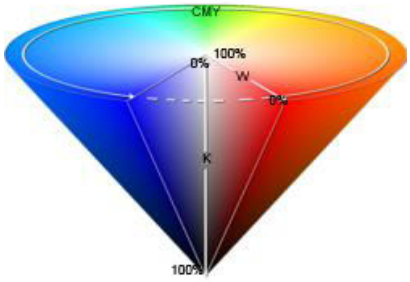


Figura 3: Cono de representación CMYKW

3 DISEÑO DEL EXTRUSOR MULTIFILAMENTO

Un extrusor de impresora 3D convencional contiene dos partes diferenciadas compuestas por varias piezas que tienen objetivos concretos (Figura 4). Existe una zona superior o zona fría, donde se realiza la alimentación del filamento mediante un sistema de empuje situado en una plataforma. La zona fría se conecta a la zona caliente a través de un tubo aislante que conduce el filamento en estado sólido. La zona inferior o zona caliente, se encarga de fundir el material y reducir su sección. Esta zona está compuesta por el bloque calentador y la boquilla.

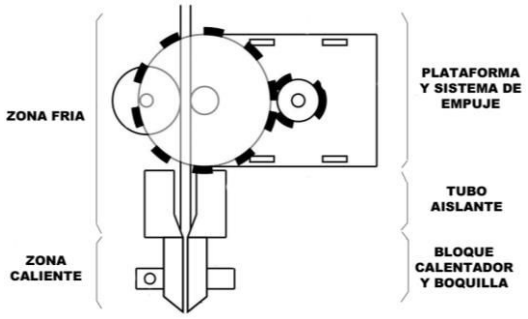


Figura 4: Partes de un extrusor de impresora 3D

El diseño del extrusor multifilamento se desarrolla en función de las conclusiones obtenidas del diseño cromático que gobierna el funcionamiento. Puesto que el sistema más restrictivo de los estudiados anteriormente es el CMYKW, se necesitan de cinco entradas de material para realizar las posibles combinaciones que este sistema necesita.

Siguiendo un esquema similar al de un extrusor convencional se diseñaron las distintas piezas que componen el sistema.

3.1 ZONA FRÍA

La zona fría está compuesta por cinco plataformas motorizadas (Figura 5) compuestas por diversas piezas que realizan el empuje del material al interior de la zona caliente. La alimentación ha de ser independiente, por lo que es necesario controlar cinco motores (paso a paso, en este caso) simultáneamente.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

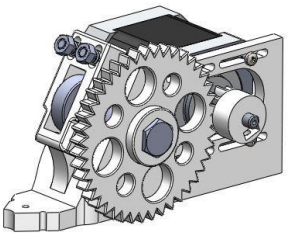


Figura 5: Plataforma y sistema de empuje

3.2 ZONA CALIENTE

El bloque calentador está formado por una pieza cilíndrica de latón (material adecuado para la trasmisión de calor y el control de temperatura) que contiene cinco orificios de entrada de material (Figura 6). Estos orificios concluyen en el mismo punto, punto donde se realiza la mezcla de filamentos.

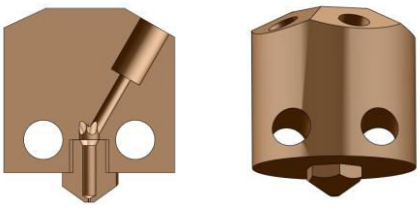


Figura 6: Bloque calentador y boquilla

Esta pieza en conjunto con una boquilla de extrusión de impresión 3D convencional forman un sistema de calentamiento, mezcla y extrusión de filamentos adecuado para las experimentaciones realizadas. La mezcla se realiza mediante la presión que los propios filamentos ejercen en el empuje.

3.2 CONJUNTO FABRICADO

Una vez fabricadas y montadas las piezas detalladas anteriormente, el conjunto queda tal como se ve en la Figura 7.

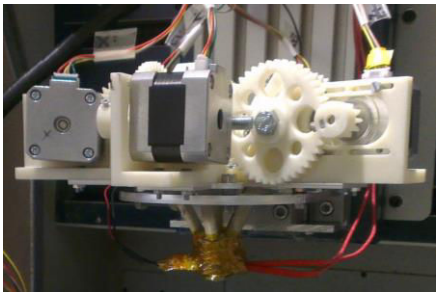


Figura 7: Conjunto fabricado

Montado sobre cualquier manipulador, impresora 3D o máquina de control numérico ejerce las funciones de herramienta del mismo modo que un mandrino o extrusor convencional.

4 ELECTRÓNICA Y SOFTWARE DE CONTROL

Para realizar el control de alimentación y de extrusión de la herramienta diseñada se necesita de una electrónica y un software de control acorde a las necesidades que el sistema presenta.

4.1 ELECTRÓNICA DE CONTROL

En la línea que se está siguiendo en el desarrollo de la impresión 3D en la comunidad RepRap [5], se ha optado por implantar una electrónica de control basada en Arduino [8]. En concreto se ha utilizado un Arduino Mega en el cual se monta una tarjeta Shield Ramps 1.4. Esta elección se basa en la facilidad de programación, montaje y control que proporcionan esta electrónica.

La electrónica de control (junto con el software de control) sigue un esquema (Figura 8) a partir del cual se controlan todos los elementos del extrusor. Por un lado se controla tanto la temperatura del extrusor, de vital importancia para una correcta impresión, como la temperatura de la cama calentadora, donde se depositan los filamentos. A su vez, se controlan independientemente cada uno de los cinco motores paso a paso que componen el sistema de empuje de material.

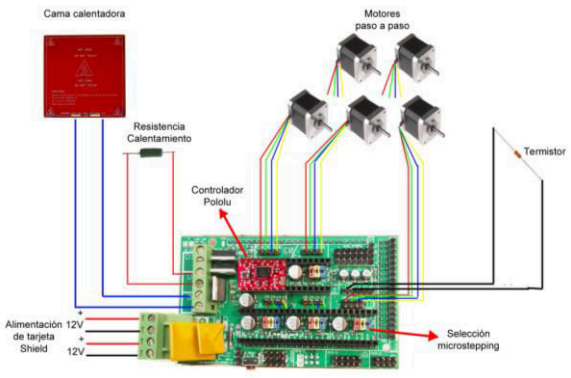


Figura 8: Esquema de la electrónica de control

4.2 SOFTWARE DE CONTROL

El software de control implementado en la electrónica de control anteriormente detallada controla las distintas partes del extrusor multifilamento. Por un lado ha de controlar tanto la

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

temperatura de extrusión como la temperatura de deposición del material y por otro lado ha de controlar el sistema de empuje de material.

Puesto que en este proyecto no se tiene en cuenta la implantación del extrusor en una impresora 3D para realizar una impresión completamente funcional se necesita de una interfaz de usuario para que se puedan mandar las órdenes y consignas al sistema. Para ello se ha diseñado una interfaz en la plataforma LabView, desde la cual se mandan y recogen las señales oportunas mediante conexión serie con la electrónica de control. La información necesaria para hacer funcionar correctamente el dispositivo comprende tanto las temperaturas del bloque calentador como de la cama calentadora, como el color seleccionado y la velocidad de cada uno de los motores del sistema de empuje de material (Figura 9). Todo en tiempo real.

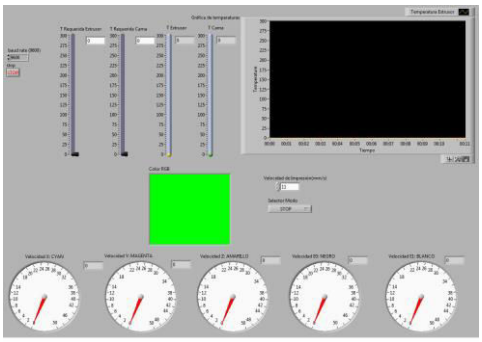


Figura 9: Interfaz de usuario

El usuario controla el movimiento de la herramienta por un lado (en este caso una máquina de control numérico convencional) y el funcionamiento del extrusor por el otro lado (Figura 10), acción que en futuras mejoras de este sistema habrá de hacerse conjunta y automáticamente.

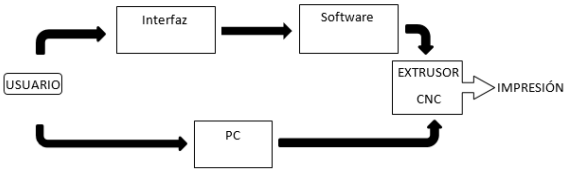


Figura 10: Interfaz de usuario

Por su parte el software de control recibe consignas tanto de temperatura como de color de impresión. Por un lado, las temperaturas recibidas se pasan a los bucles de control de temperatura donde se controlan mediante un PID con seguimiento integral [4] que ajusta la temperatura a la consigna sin afectar el windup que se produciría en un PID simple.

Por otro lado, tanto el color consigna (en RGB) como la velocidad total de extrusión se gestionan mediante un algoritmo de codificación cromática que reparte proporcionalmente a cada sistema de empuje de material de cada uno de los colores primarios la actuación necesaria. Una vez traducido en velocidad de pulsos/s, las señales se mandan a los controladores de motores paso a paso. Todo ello se muestra a continuación en a Figura 11.

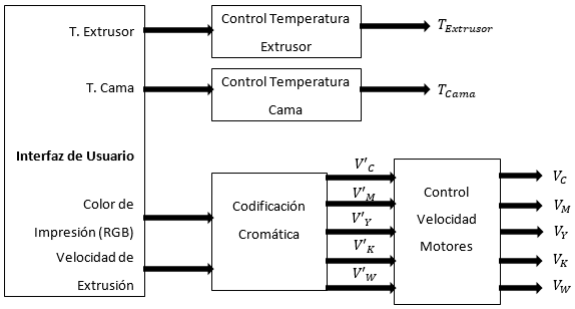


Figura 11: Esquema del software de control

5 EXPERIMENTOS

Una vez diseñada, construida y controlada convenientemente la herramienta objeto de estudio, se realizaron una serie de experimentos de pruebas de color y medición de transiciones entre cambios de color.

Para realizar las pruebas de impresión se adquirieron filamentos de los colores primarios necesarios (cian, magenta, amarillo, negro y blanco) de material ABS, cuyas propiedades hacen de la pieza imprimida un sólido resistente y duradero. Para comprobar el color obtenido y compararlo con la consigna enviada se utilizó un sensor de color TCS230.

En cuanto al sistema de movimiento de la herramienta se utilizó una máquina de control numérico CNC Spline Systems CPM Series, que proporcionaba las características necesarias para una herramienta pesada como la diseñada.

5.1 IMPRESIÓN INDEPENDIENTE DE LOS COLORES PRIMARIOS

Para realizar correctamente la obtención de colores secundarios se identificó el grado de pureza de los colores primarios disponibles. Puesto que los filamentos se adquirieron en comercios especializados en impresión 3D pueden diferir respecto del color primario puro deseado. Tal como se ve en las Figuras 12 a 15, en el caso del cian y el magenta existe una diferencia respecto del primario

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

mientras que el amarillo, el negro y el blanco son prácticamente colores puros.

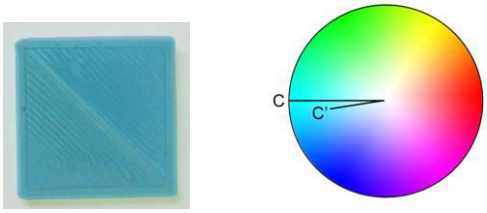


Figura 12: Impresión y comprobación del color cian

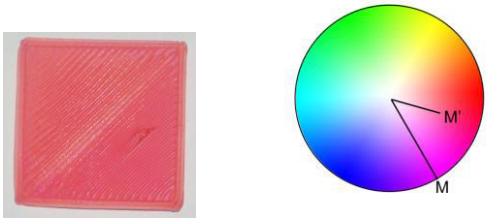


Figura 13: Impresión y comprobación del color magenta

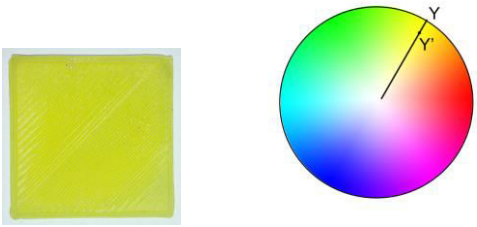


Figura 14: Impresión y comprobación del color amarillo

Figura 15: Impresión de los colores negro y blanco

5.2 IMPRESIÓN DE CADA COLOR SEGÚN LOS DIFERENTES SISTEMAS CROMÁTICOS

5.2.2 Escala de Grises

Primeramente, se experimentó con el sistema de Escala de Grises por ser el más sencillo (Figura 16). En este se estudiaron varias proporciones de blanco-negro en las mezcla.

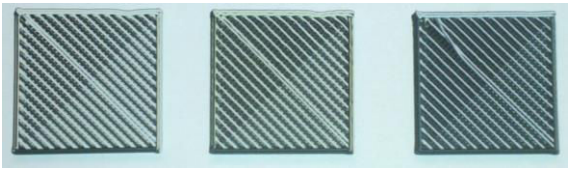


Figura 16: Impresión de las muestras de Escala de Grises

Tal como se observa en las imágenes la simultaneidad del color blanco y el color negro produce el llamado “efecto pasta de dientes”. Los dos filamentos no llegan a mezclarse y se genera un filamento con dos caras de distinto color. Después de diversas consideraciones se llegó a la conclusión de que este efecto está muy relacionado con el tinte utilizado en la confección del color negro y del color blanco, por lo que hubo que tenerlo en cuenta para los siguientes experimentos.

5.2.2 Sistema CMY

Puesto que los colores primarios de los cuales se dispone no son puros al 100% se realizó una comprobación de la muestra obtenida en la impresión respecto de un cálculo teórico del resultado esperado. A continuación se muestran las muestras obtenidas en las Figuras 17 a 19.

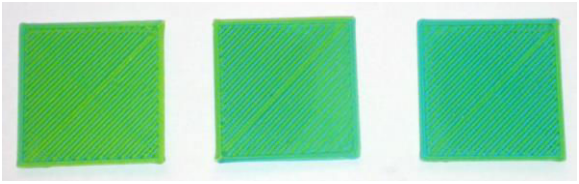


Figura 17: Impresión del color verde

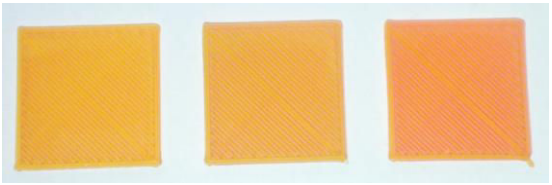


Figura 18: Impresión del color rojo

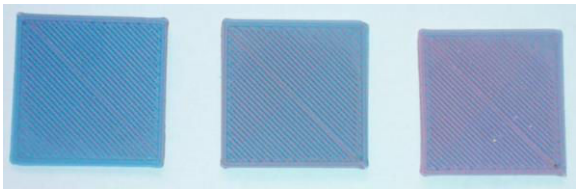


Figura 19: Impresión del color azul

Como se observa, pese a que el resultado final difiere de los colores secundarios esperados, los cálculos teóricos se acercan notablemente que se realizaron

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

teniendo en cuenta el desplazamiento de los colores primarios coincide con las mediciones obtenidas con el sensor de color.

5.2.3 Sistema CMYK

Una vez comprobado el error que se produce en las muestras del sistema CMY, se estudió el efecto que el negro produce en la reducción de brillo. Así pues, se hicieron distintas muestras de los colores experimentados en el sistema CMYK utilizando distintas proporciones de brillo en la consigna (Figuras 20 a 22).

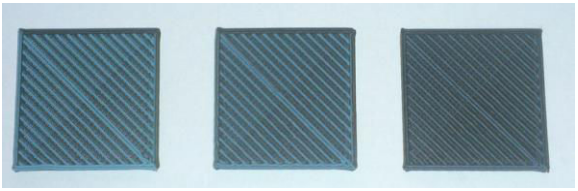


Figura 20: Impresión del color cian+negro

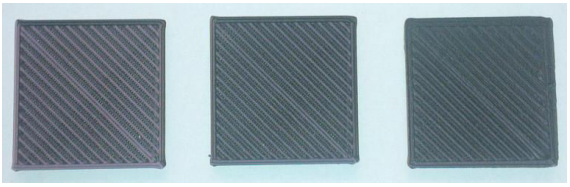


Figura 21: Impresión del color magenta+negro

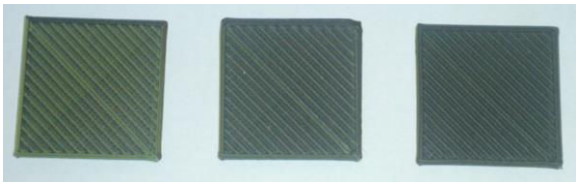


Figura 22: Impresión del color amarillo+negro

Tal como se puede observar, el color negro tiene una mayor influencia de reducción de brillo de lo esperado, lo que provoca la oscuridad de las muestras obtenidas.

5.2.4 Sistema CMYKW

Seguidamente se experimentó el comportamiento de la mezcla si en la consigna existían componentes de reducción de saturación sin y con simultaneidad con la reducción de brillo, tal como se muestra en las Figuras 23 y 24.

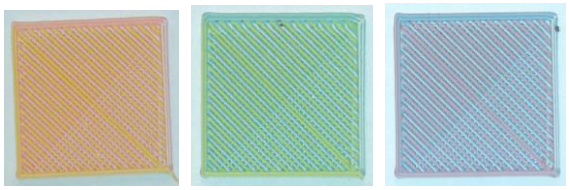


Figura 23: Impresión de los colores secundarios+blanco

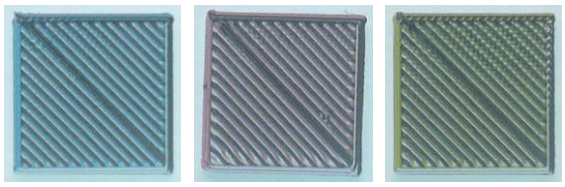


Figura 24: Impresión de los colores primarios+blanco+negro

Como se observa, la simultaneidad del blanco y el negro provoca el comentado anteriormente "efecto pasta de dientes", lo que se solucionaría con un sistema de mezcla activa en el interior de la cámara de mezclado.

5.3 LONGITUD DE TRANSICIÓN Y TIEMPO DE RESPUESTA EN CAMBIOS DE COLOR

Para la implantación del sistema en una impresión 3D en color completamente funcional hay que tener en cuenta las transiciones que se producen en los cambios de color. Puesto que se trata de un sistema donde se produce una acumulación de material que en un posible cambio de color hay que vaciar, se ha de tener en cuenta la longitud de dicha transición y el tiempo de respuesta, para proporcionar un control ajustado.

Para experimentar los cambios de color y tabular los resultados se ha utilizado una muestra de impresión en forma de espiral cuadrada, donde fácilmente se conoce la longitud de la transición producida.

Así pues, las longitudes mayores se produjeron en los cambios que se pasaba de negro a otro color, produciéndose una longitud de aproximadamente 2700mm y un tiempo de respuesta de 245s imprimiendo a una velocidad de 11mm/s.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

Partiendo de los resultados que se obtuvieron en los experimentos realizados se pueden concluir una serie de valoraciones que ayudarán a enfocar las líneas futuras de desarrollo de este prototipo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

6.1 CONCLUSIONES

Puesto que comienza a surgir la necesidad de implantar el color como variable fundamental en el prototipado 3D, parece notable destacar el inicio de una tecnología a partir de un primer prototipo de extrusor multifilamento con un sistema cromático concreto que gobierna el funcionamiento del mismo. Así pues, la construcción de este primer prototipo introduce una herramienta de desarrollo donde se puede experimentar en un futuro otro tipo de mejoras.

Por otra parte, a la vista de los resultados experimentales se puede concluir que pese al cumplimiento de las consignas marcadas y a la obtención de muestras de color semejantes a los cálculos teóricos realizados, es primordial que colores primarios utilizados sean lo más aproximados posibles a los colores primarios puros del sistema cromático CMYKW. Cualquier diferencia en uno de ellos introduce notables errores de obtención de la consigna deseada. A pesar de ello, se han obtenido datos de referencia mucha utilidad, como la dominancia de unos colores sobre otros y longitudes de las transiciones de cambio de color.

6.2 LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

Puesto que este proyecto es el inicio de un desarrollo que ha de completarse con la implantación completamente funcional de un extrusor multifilamento en la impresión 3D, se proponen a continuación una serie de líneas de desarrollo y mejoras que se pueden considerar para el futuro.

Se pueden mejorar notablemente partes del diseño que en este proyecto se han comprobado que tenían deficiencias. Por ejemplo, los tubos aislantes, parte muy sensible al paso del material sólido. Así mismo, a la vista de los resultados de algunas de las muestras imprimidas en las cuales se identifica el "efecto pasta de dientes", sería conveniente desarrollar un sistema de mezclado activo de los componentes. Es decir, en lugar de realizar la mezcla simplemente con la presión que cada filamento ejerce, forzar la mezcla con un elemento externo.

Otra de las mejoras propuestas es el desarrollo de un método de evacuación de las transiciones en cambios de color. Puesto que el color (o colores) de una pieza imprimida solo se verían en la superficie de la misma, se propone la implementación de un algoritmo de planificación de trayectorias, ocultando las transiciones en el interior de la pieza. De otra forma se podría considerar un sistema de evacuación de transiciones en una zona específicamente dedicada a ello, lo que simplificaría el proceso.

Por último se propone el desarrollo de un software y planificación en la implantación de un extrusor multifilamento para impresión 3D en color automática y completamente funcional, teniendo en cuenta las mejoras necesarias propuestas anteriormente.

Referencias

[1] Andueza García, V., (2014) PFC: Extrusor Multifilamento para Impresión 3D en Color, Universidad de Málaga, España.

[2] Muralisrinivasan Natamai Subramanian: Basics of Troubleshooting in Plastics Processing: An Introductory Practical Guide. EEUU.

[3] Morton-Jones, D.H. (1991) Chapman & Hall: Polimer Processing. Londres, Reino Unido.

[4] Karl J. Astrom, Tore Hagglund: Control PID Avanzado. Lund, Suecia.

[5] Comunidad RepRap, Autores varios: RepRap Wiki.
(http://reprap.org) Consultado 01/02/2014.

[6] Comunidad RepRap Proyect, Autores varios: Ramps v1.4.
(http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/es)
Consultado 01/02/2014.

[7] Comunidad Makerbot, Autores varios. Wiki Makerbot.
(http://www.makerbot.com/support/archive/)
Consultado 01/02/2014.

[8] Sitio oficial plataforma Arduino, Autores varios: Arduino Forum.
(http://www.arduino.cc)
Consultado 01/02/2014.

[9] Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen.(2001) AIDO: CMYK Parámetros de Impresión. España.

[10] Coloricer, Autores varios.
(hhtp.//www.coloricer.org)
Consultado 01/02/2014.

[11] 3-way Quick-fit Extruder and Colour Blending Nozzle, RichRap. Reprap development and further adventures in DIY 3D printing
(hhtp.//richrap.blogspot.com)
Consultado 01/02/2014.

[12] Corbett, J.(2012). Reprap Colour Mixing Project. Bath, Reino Unido.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Concurso en Ingeniería de Control 2014.
Operación Óptima de la planta de 4 tanques. Control multivariable.

Alberto Pajares Ferrando, Francesc Xavier Blasco Ferragud
alpafer1@upv.es, xblasco@isa.upv.es

Universitat Politècnica de València

Resumen

En el presente trabajo, se expone el desarrollo de un sistema para el control de la planta de cuatro tanques. Este proceso multivariable consta de cuatro tanques de agua interconectados, y es ideal para ilustrar muchos conceptos de control multivariable.
El sistema tiene como objetivo minimizar un indicador dado. Un sistema de control suele ser jerárquico: en la capa superior se ejecuta el denominado Real Time Optimizer (RTO), que proporciona el punto óptimo en cada instante. Este punto óptimo se proporciona al sistema de control avanzado que debe lograr que la planta evolucione con el menor coste posible y se mantenga en el punto de operación óptimo. En este trabajo se ha decidido utilizar un Control Predictivo Generalizado (GPC). Por otro lado, un algoritmo puede ser útil en distintas fases del sistema. En primer lugar puede ser importante para el cálculo de puntos óptimos. Además puede emplearse para definir los parámetros del controlador.

Palabras clave: *Control Predictivo Generalizado*, *Real Time Optimizer*, *planta de 4 tanques*.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema tiene como objetivo el desarrollo del control para la planta de los 4 tanques. La implementación de este proceso fue propuesta por Karl H. Johansson [1], y ha sido muy utilizada por su interés como problema de control y su sencillez de uso.

En la figura 1, se observa el esquema de la planta de los 4 tanques. Ésta, consta de 4 depósitos, 2 inferiores (tanques 1 y 2) y 2 superiores (tanques 3 y 4) que desaguan en los tanques inferiores. Los tanques se llenan con 2 bombas que impulsan sendos caudales y desde el depósito colector situado en la parte baja de la planta. Estos caudales entran en sendas válvulas de 3 vías que dividen el caudal entre 2 ramas, de forma que una fracción (denominadas γ_a y γ_b) se envía por una de las ramas y el resto por la otra. Las fracciones se indican en tanto por uno y se fijan manualmente mediante la apertura de dichas válvulas.

De esta forma, la válvula γ_a enviará un caudal al tanque 1 y el resto al tanque 4. Del mismo modo, la válvula γ_b enviará un caudal al tanque 2 y el resto entrará en el tanque 3. El tanque 3 se descarga sobre el tanque 1 y este sobre el depósito colector. El tanque 4 se descarga sobre el 2 y este en el tanque colector.

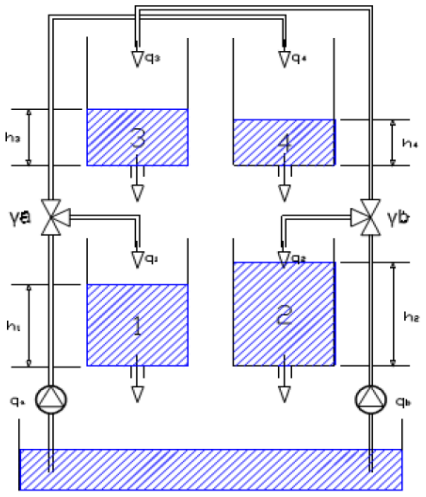


Figura 1: Planta de Johansson.

Esta planta es multivariable ya que presenta dos variables manipulables q_a y q_b. Normalmente, las variables que se desean controlar son el nivel de líquido en los depósitos inferiores.

Asimismo, la planta presenta una dinámica no lineal, ya que las ecuaciones que describen un depósito no son lineales. La planta se describe bien mediante un modelo de orden 4 basado en primeros principios. Además la planta presenta restricciones en las actuaciones (caudales máximos y mínimos) y en las variables del proceso (niveles máximos y mínimos en los depósitos).

La finalidad de este documento, es presentar un control para este sistema descrito, incluyendo dos

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

etapas principales: una superior, que debe proporcionar el punto óptimo al que llegar en cada instante; y otra de control avanzado que debe llevar a la planta con el menor coste posible. El artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se dará una descripción general del modelo de la planta de los 4 tanques; en la sección 3, se explicarán los objetivos del control a realizar; en la sección 4, se detallará la implementación diseñada para llevar a cabo el control; en la sección 5, se validará el control mediante un ensayo; Finalmente, en la sección 6, se presentan las conclusiones.

2. MODELO

El modelo de la planta de Johansson se puede expresar como se observa en las ecuaciones diferenciales 1-4.

$$A\frac{dh_1}{dt} = -a_1\sqrt{2gh_1} + a_3\sqrt{2gh_3} + \gamma_a\frac{q_a}{3600} \quad (1)$$

$$A\frac{dh_2}{dt} = -a_2\sqrt{2gh_2} + a_4\sqrt{2gh_4} + \gamma_b\frac{q_b}{3600} \quad (2)$$

$$A\frac{dh_3}{dt} = -a_1\sqrt{2gh_3} + (1-\gamma_b)\frac{q_b}{3600} \quad (3)$$

$$A\frac{dh_4}{dt} = -a_1\sqrt{2gh_4} + (1-\gamma_a)\frac{q_a}{3600} \quad (4)$$

En estas ecuaciones se denota el nivel de líquido en el tanque h_i. Este nivel se mide en metros. Los caudales de cada rama q_z, medidos en metros cúbicos por hora, son variables manipulables.

El parámetro a_i es la sección equivalente del orificio de descarga del depósito h_i y la sección de todos los tanques es igual y se denota por A. Las secciones se miden en metros cuadrados. Los parámetros γ_a y γ_b indican la apertura de la válvula de 3 vías. La unidad de tiempo del modelo es segundos. La actualización del valor de las variables manipulables que se aplicarán y la actualización de las medidas de los sensores se realiza cada 5 segundos.

Los parámetros presentes en el modelo de la planta toman los siguientes valores:

- Sección de los depósitos:

$$A = 0.03\ m^2$$

- Sección equivalente de los orificios de descarga:

$$a_1 = 1.3104x10^{-4}m^2$$
$$a_2 = 1.5074x10^{-4}m^2$$
$$a_3 = 9.2673x10^{-5}m^2$$
$$a_4 = 8.8164x10^{-5}m^2$$

- Apertura de las válvulas de 3 vías:

$$\gamma_a = 0.3$$
$$\gamma_b = 0.4$$

- Restricciones de operación de las variables:

$$0.2\ m \le h_i \le 1.2\ m \qquad i = 1,2,3,4$$
$$0\ {m^3}/{h} \le q_z \le 2.5\ {m^3}/{h} \qquad z = a,b$$

- Tiempo de muestreo mínimo

$$Tm = 5s$$

3. OBJETIVOS DEL CONTROL

El objetivo principal del sistema de control a diseñar será la operación óptima de la planta conforme a un determinado coste de operación, teniendo en cuenta los límites de operación que presenta la planta.

El coste de operación que se va a considerar en este sistema consta de dos términos asociados a los dos objetivos principales:

1. Minimización del consumo energético de la planta. Esto se cuantifica mediante el coste de la impulsión del agua a los tanques, que es una función cuadrática de los caudales. Así este término normalizado tendrá la forma de:

$$J_{ce} = {q_a}^2 + c{q_b}^2 \quad (5)$$

siendo c el precio unitario de la impulsión del agua.

2. Maximización del volumen acumulado en los depósitos inferiores. Este término se cuantifica mediante la función de coste que depende inversamente del volumen acumulado:

$$J_{va} = p\frac{V_{min}}{A(h_1+h_2)} \quad (6)$$

siendo p el precio unitario de la función de coste de volumen acumulado y V_{min} el mínimo volumen de líquido que se puede acumular en los depósitos inferiores, de acuerdo a los límites de operación. En este caso $V_{min} = 0.012\ m^3$. Nótese que esta función asigna un coste p cuando el volumen de líquido es el mínimo, y el coste disminuye a medida que el volumen acumulado aumenta. Por tanto minimizar este coste implica una maximización del volumen.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Así, la función de coste final se deriva de la escalarización de estos 2 objetivos de la siguiente forma:

$$J(h,q,c,p) = ({q_a}^2 + c{q_b}^2) + p\frac{V_{min}}{A(h_1+h_2)} \qquad (7)$$

Los parámetros c y p son ajustables y podrían cambiar con el tiempo. Las unidades de esta función de coste son unidades monetarias por segundo.

Para el cálculo del índice de desempeño total ID, que indique el coste de operación de la planta, se utiliza la siguiente expresión:

$$ID(t) = \int_0^t (J\big(h(\tau),q(\tau),c(\tau),p(\tau)\big) - J^*\big(c(\tau),p(\tau)\big) + J_r\big(h(\tau)\big)d\tau \qquad (8)$$

siendo $J^*\big(c(\tau),p(\tau)\big)$ el coste de operación óptimo para los parámetros c y p. El término $J_r\big(h(\tau)\big)$ representa el coste asociado a la violación de restricciones. Por cada centímetro que se viola la restricción, el coste aumenta en 1000 unidades monetarias por segundo. El objetivo es diseñar controladores avanzados de la planta que minimicen el coste económico medio de la evolución del sistema controlado en un ensayo en el que los parámetros podrían variar.

Este planteamiento es muy frecuente en la industria de procesos, en la que el sistema de control se suele diseñar para lograr la operación óptima de una planta. El sistema de control suele ser jerárquico: en la capa superior se ejecuta un módulo, RTO, que proporciona el punto de operación óptimo en cada instante. El punto de operación óptimo calculado se proporciona a la capa inferior, en la que el sistema de control debe lograr la planta evolucione con el menor coste posible y se mantenga en el punto de operación óptimo proporcionado. El tiempo de cálculo del RTO suele ser mucho mayor que el tiempo de muestreo del control avanzado.

4. IMPLEMENTACIÓN

Para llevar a cabo la implementación, en primer lugar se deberá comprobar si los puntos de funcionamiento proporcionados son realmente los óptimos, teniendo en cuenta las restricciones que existen en el sistema (ver tabla 1).

Tabla 1: Puntos Óptimos de Operación

Precios	h_1	h_2	h_3	h_4	q_a	q_b
c=1, p=20	0.5955	0.6616	0.5384	0.7682	1.7602	1.8072
c=1, p=30	0.7293	0.8102	0.6594	0.9408	1.948	2
c=1, p=10	0.4211	0.4678	0.3807	0.5432	1.4802	1.5197
c=1.5, p=20	0.4675	0.6793	0.3015	1.0493	2.0573	1.3525
c=1, p=40	0.8421	0.9356	0.7614	1.0863	2.0933	2.1491
c=0.5, p=10	0.6391	0.4601	0.8473	0.2649	1.0337	2.2671

Para este cometido se pueden emplear diferentes algoritmos. Se ha decidido emplear un algoritmo evolutivo multiobjetivo (MOEAs [2] por sus siglas en ingles), ya que proporciona todas las características deseables para este proceso. El empleo de este tipo de algoritmos [3] puede resultar beneficioso, pues permite optimizar funciones de coste no-lineales, no-convexas y con restricciones. Este tipo de técnicas holística ha mostrado ser efectiva para abordar problemas de diseño complejos.

En concreto en este trabajo se trabajará con el algoritmo evolutivo multiobjetivo SP-MODE[1] [4], para realizar este cálculo, porque ha mostrado buen desempeño y tiene código abierto. Además es fácil de interpretar para cualquier usuario ajeno a este tipo de algoritmos.

Para la comprobación de los puntos óptimos se fijan los parámetros c y p, y se fijan los valores topes de las entradas q_a y q_b (variables de decisión). Una vez definido esto, se intenta minimizar los dos sumando del indicador que se muestra en la ecuación 7. Al introducirlo en el algoritmo, se obtienen el conocido como Conjunto de Pareto, en el cual, minimizando la suma de los dos objetivos se obtienen los mismos puntos óptimos que se proporcionan en el concurso. Por lo tanto se concluye que son los puntos óptimos para cada uno de los precios dados, teniendo en cuenta las restricciones a cumplir, que se detallan en la sección anterior.

Una vez comprobados los puntos óptimos, podemos centrarnos en el control. El sistema de control, ver figura 2, se compone de cinco zonas diferentes. En la primera de ellas se define el ensayo a realizar. La segunda y tercera pertenecen al control propiamente dicho, y se comentarán más detalladamente a continuación. La zona cuarta es en la cual se calcula el índice de desempeño del ensaño introducido. Por último la última zona es en la cual se muestran los resultados obtenidos, tanto respecto al índice a minimizar como respecto a los niveles y caudales de la planta.

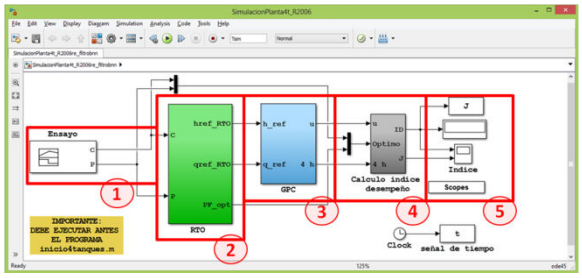


Figura 2: Sistema de Control.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

En lo que respecta al control, primero se definirá la etapa inferior del sistema, zona 2. Para esta etapa, se proporcionan dos posibles problemas de control, control PID o control multivariable. Se ha decidido utilizar un control multivariable, ya que estos trabajan más cerca de los límites de operación de la misma, por lo que optimizan más los recursos proporcionados por la planta.

Para el control multivariable se ha optado por realizar el control mediante un Control Predictivo Generalizado (GPC [5]). Los GPCs son una clase de controladores más general de los denominados Controladores Predictivos Basado en Modelos (MBPC [6]). Estos, necesitan de un modelo de predicción que predice la salida del proceso para cualquier instante futuro. El modelo de Predicción que sirve de base para el diseño de un GPC se deduce a partir del modelo de proceso lineal con perturbación, ambas definidas en f.d.t.

Para el esquema de control elegido, se deberá linealizar el sistema alrededor del punto óptimo previamente calculado por la etapa superior (RTO). Una vez linealizado recalculamos los polinomios que componen el GPC que se detallan posteriormente teniendo en cuenta el punto de funcionamiento en el que se encuentra el sistema. Para definir un GPC es necesario definir los siguientes parámetros de ajuste:

- N_1: mínimo horizonte de predicción: Si el retardo del proceso es conocido $N_1 = d + 1$, en caso contrario $N_1 = 1$.
- N_2: máximo horizonte de predicción: Grande, para que contenga toda la información dinámica de la planta.
- N_u: horizonte de control: Determina los grados de libertad disponibles. N_u pequeños produce acciones de control más pequeñas y salidas más lentas.
- $\propto_i, \lambda_j$: Factores de ponderación: Permiten dar diferentes pesos a cada uno de los factores del índice, es decir mayor o menor importancia relativa de unos sobre otros.
- T: Prefiltro polinomio

Para definir estos parámetros del GPC, se ha optado por introducirlos como variables de decisión en un algoritmo genético ([7]), en el que se tiene como objetivo la minimización del índice dado (ecuación 7), para un ensayo tipo como el proporcionado en el enunciado del presente concurso. De esta forma el algoritmo nos calculará los parámetros óptimos del controlador para dicho ensayo. Para ello, se definen las siguientes variables de decisión:

- N_2 $30 < N_2 < 150$
- N_u $1 < N_u < 6$
- $\propto_i$ $0 < \propto_i < 2$
- λ_j $0 < \lambda_j < 2$
- $T = (1 - TTz^{-1})^2$ 0.85<TT<0.95

El mínimo horizonte de precisión se fija a la unidad.

Con ello, obtenemos los siguientes parámetros del GPC que minimizan el indicador propuesto:

- $N_1 = 1$
- $N_2 = 60$
- $N_u = 2$
- $\propto_i = 0$
- $\lambda_j = 0$
- $T = (1 - 0.9z^{-1})^2$

Una vez definidos estos parámetros, ya se pueden calcular cada uno de los polinomios que componen el GPC, tal y como se observa en la figura 3, estos son H, T, R y S.

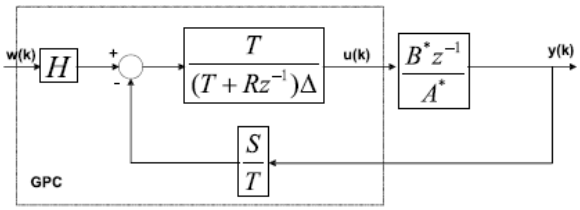


Figura 3: Diagrama de bloques GPC.

Estos polinomios se recalcularán en torno al punto de funcionamiento cada vez que este cambie de posición, es decir, si varían las variables de entrada del sistema *c* y *p*. Debido a que las variaciones entre los GPCs de diferentes puntos óptimos varían poco, no es necesario interpolar entre ellos, ya que estos pequeños cambios no producen respuestas indeseadas.

Una vez definida la capa inferior, se debe definir la capa superior del control, el RTO, zona 1 de la figura 2. Esta etapa deberá, con la información de entrada del sistema, obtener los niveles y los caudales de entrada óptimos que se introducirán en el sistema de control. Para este cálculo y para reducir el coste computacional, se introduce al optimizador un punto cercano al óptimo. Este punto cercano se calcula mediante una tabla previamente calculada fuera de línea (off-line).

Se ha demostrado, mediante diferentes ensayos, que resulta beneficioso con respecto al indicador del sistema, introducir escalones de diferentes magnitudes en las zonas de transición. Con estos escalones se consigue alcanzar con mayor rapidez el óptimo, con lo que minimizamos el coste.

Es por ello, por lo que se ha introducido en un algoritmo genético, cada uno de los escalones

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

posibles dentro de los 6 puntos óptimos proporcionados en el enunciado (tabla 1), para el cálculo de los escalones óptimos para cada transición. Así se calculará, fura de línea, una tabla con los escalones óptimos para cada una de estas transiciones. En el algoritmo se intenta minimizar el índice de desempeño teniendo como variables de decisión las variaciones de los niveles y tiempos de cada uno de los escalones (flechas rojas) tal y como se observa en la figura 4.

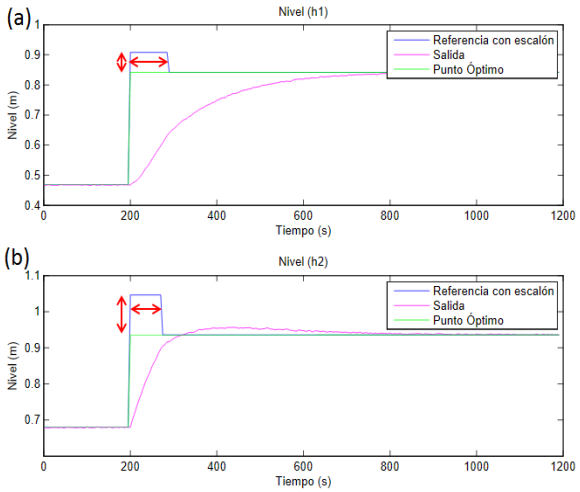


Figura 4: Escalones óptimos de h_1 (a) y h_2 (b).

Debido a la poca relación entre cada uno de los escalones óptimos para cada transición, se ha decidido introducir una tabla en la cual elegir el escalón a introducir dependiendo de la semejanza del nivel que se tiene y al que se desea llegar. De esta manera al introducir un cambio en la entrada del sistema, el RTO calculará el punto de funcionamiento óptimo. Posteriormente se sumarán, al punto óptimo calculado, un escalón. La magnitud y el tiempo del escalón será igual al escalón óptimo más parecido que se encuentre en la tabla, calculada off-line. Es decir, al cambiar el punto de funcionamiento óptimo la etapa superior introduce un escalón según el nivel actual y el que se desea conseguir.

Más tarde se calcularán los caudales que provocan estos niveles. Finalmente estos niveles y caudales calculados serán la salida del RTO. De esta manera se consigue alcanzar antes el punto óptimo y con ello penalizar menos al indicador dado.

En la etapa de cálculo de índice de desempeño, zona 4 de la figura 2 se necesitará como entradas, las acciones de control (q_a y q_b), y los niveles, (h_1 a h_4). Además se deberá conocer el punto óptimo en cada momento, ya que es necesario para restarlo al índice de cada instante (J^* en la ecuación 8). Esta etapa también se encarga de penalizar con 1000 unidades monetarias por segundo en los instantes que se infrinja alguna restricción del sistema.

Por último en la zona 5 (ver figura 2), se observa la zona de resultados, en la cual se podrá ver el resultado del índice de desempeño, así como las gráficas pertenecientes a las acciones de control y las salidas obtenidas.

5. EVALUACIÓN

A modo de ejemplo, vamos a introducir un ensayo para evaluar los resultados obtenidos. El ejemplo es el que está definido como ensayo tipo:

- Se parte de un punto de equilibrio c=1 y p=20.
- El ensayo empieza variando los precios unitarios a c=1.5 y p=20.
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a c=1 y p=40.
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a c=0.5 y p=10.
- Transcurridos 1200 segundos, los precios unitarios cambian a c=1 y p=20.
- Transcurridos 1200 segundos, se finaliza el ensayo.

Con este ensayo, obtenemos las salidas del sistema h_1 y h_2 mostrada en la figura 5.

Se observa cómo se han introducido diferentes escalones de diferentes magnitudes en cada una de las transiciones que se producen. Además podemos observar en la figura 6 las acciones de control introducidas que provocan las salidas anteriores, que lógicamente también tienen diferentes escalones.

Por último observamos que el indicador obtenido es de 411,8, tal y como se observa en la figura 7.

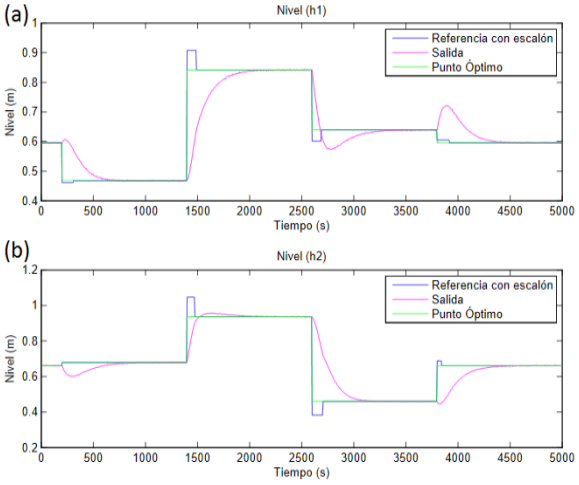


Figura 5: h_1 (a) y h_2 (b)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

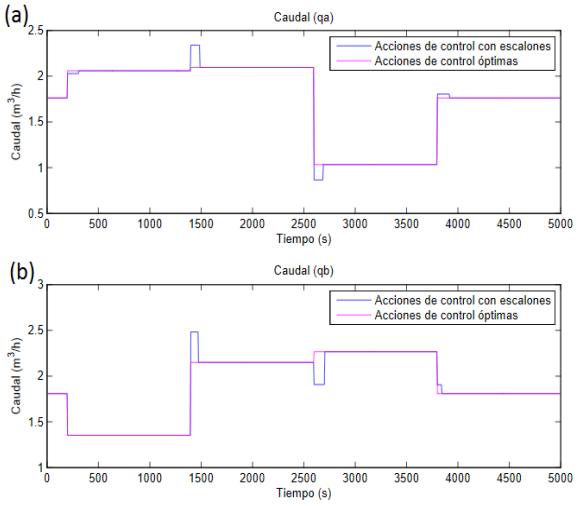


Figura 6: q_a (a) y q_b (b)

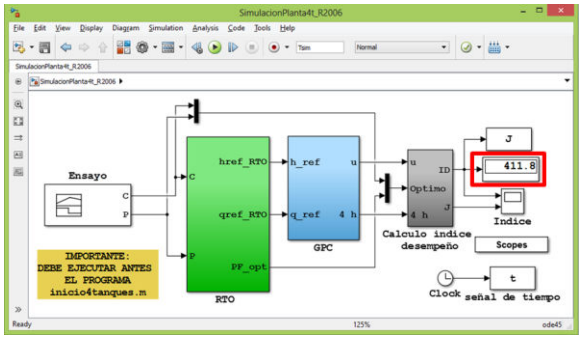


Figura 7: Índice de desempeño

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo, se ha presentado un control para el modelo de planta de 4 tanques. En él, se tiene como objetivo minimizar un índice de desempeño.

El sistema tiene como entradas los precios unitarios, parámetros c y p. Para cada entrada se tiene un óptimo que minimiza el índice de desempeño. El control incluye dos etapas principales: una superior (RTO), que debe proporcionar el punto óptimo; y otra de control avanzado, que debe llevar a la planta con el menor coste posible al punto calculado.

Además se ha comprobado que al introducir escalones al inicio de los cambios de entrada, se minimiza el índice al alcanzar más rápido el óptimo. Es por ello, por lo que la etapa superior introduce escalones de diferentes magnitudes dependiendo de la semejanza a unas transiciones calculadas previamente off-line.

Con respecto a la etapa inferior del control, se ha diseñado mediante un GPC. Este, es recalculado en cada cambio de punto de funcionamiento alrededor del mismo.

Como trabajos futuros, se podría buscar la forma de realizar una RTO que calculará el escalón óptimo a introducir on-line, y no mediante la semejanza de los valores calculados off-line. No se ha realizado de esta manera ya que esto no se ha encontrado la forma de que este proceso tarde menos tiempo que el periodo de muestreo.

Referencias

[1] Johansson, KH (2000). El proceso de cuádruple tanque:. Un proceso de laboratorio multivariable con un ajuste de cero *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* , *8* (3), 456-465.

[2] Coello Coello, C., feb. 2006. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. Computational Intelligence Magazine, IEEE 1 (1), 28-36.

[3] DAS, S., Suganthan, P. N., 2010. Differencial evolution: A survey of the state-of-the-art. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on.

[4] Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., Martínez, M., 2010b. Multiobjective design of continuous controllers using differencial evolution and spherical pruning. In: Chio, C. D., Cagnoni, S., Cotta, C., Eber, M., Ekárt, A., I.Esparcia-Alcaráz, A., Goh, C.-K., J.Merelo, J., Neri, F.,Preuss, M., Togelius, J., N.Yannakakis, G. (Eds.), Applications of Evolutionary Computation, Part I. Vol. LNCS 6024. Springer-Verlag, pp. 532 – 541.

[5] Clarke, D. W., Mohtadi, C., & Tuffs, P. S. (1987). Generalized predictive control—Part I. The basic algorithm. *Automatica*, *23*(2), 137-148.

[6] Sanchis, J., Martınez, M., Blasco, X., & Senent, J. (1997). Experimentación en control predictivo basado en modelos. práctica para la ensenanza de controladores predictivos generalizados (GPCS) en la ETSII Depto. *De Ingenieria de Sistemas, Computadores y Automática. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s*, (46071).

[7] Blasco Ferragud, F. X. (2012). Control predictivo basado en modelos mediante técnicas de optimización heurística. Aplicación a procesos no lineales y multivariables.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

CONTROL PREDICTIVO PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS POR LOTES EN LA INDUSTRÍA AZUCARERA

A. Rodríguez, L.F. Acebes, C. de Prada, R. Mazaeda
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela de Ingenierías Industriales.
Universidad de Valladolid.C/ Real de Burgos s/n. 47011 Valladolid.
email: {alexander.rodriguez; felipe; prada}@autom.uva.es ; rogelio@cta.uva.es

Resumen

En este trabajo se formula una estrategia de control predictivo basado en un modelo de conocimiento para la planificación de procesos por lotes en la industria azucarera. Se propone una solución en el ámbito del control predictivo no lineal, haciendo hincapié en la obtención de modelos para este tipo de procesos que contenga baja carga computacional, pocos parámetros y que sean adecuados al uso por el control predictivo. Finalmente la estrategia propuesta ha sido implementada y probada usando la herramienta de modelado y simulación de sistemas dinámicos orientado a objetos EcosimPro.

Palabras clave: Control Predictivo,Producción de azúcar, planificación de la producción.

1 INTRODUCCIÓN

El control predictivo basado en modelos (MBPC) o simplemente (MPC), se enmarca dentro de los controladores óptimos, es decir, de aquellos en los que las actuaciones responden a la optimización de un criterio. El criterio a optimizar o función de coste, está relacionado con el comportamiento futuro del sistema, que se predice gracias a un modelo dinámico del mismo, denominado modelo de predicción.[1]

Una de las propiedades más atractiva del MPC es su formulación abierta, que permite la incorporación de distintos tipos de modelos de predicción, sean lineales o no lineales, monovariables o multivariables y la consideración de restricciones sobre las señales del sistema. Esto hace que sea una estrategia utilizada en diversas áreas de control. Además es una de las pocas técnicas que permite controlar sistema con restricciones incorporando estas en el propio diseño del controlador.

En base a esto nos hemos propuesto desarrollar un controlador predictivo para la planificación de proceso por lotes en la industria azucarera. El control predictivo que proponemos da lugar a un problema típico de optimización no lineal. En la Figura 1 podemos ver la estructura interna, compuesta básicamente por un bloque llamado coste, en el que se ejecutará un modelo simplificado (discreto y continuo) del proceso. En este bloque y a medida que se ejecuta el modelo del proceso se calcula la correspondiente función de coste J, cuyo valor se requiere optimizar y los valores de las variables asociadas a restricciones. Por otro lado, disponemos de un algoritmo de optimización que propone la ley de control que se aplica al modelo simplificado del proceso, se simula el comportamiento futuro, se calcula el valor de la función de coste al final de la predicción y en función del valor obtenido, el algoritmo vuelve a proponer una nueva ley de control y así sucesivamente hasta que se encuentre la ley de control óptima que hace mínima o máxima el valor de dicha función de coste.

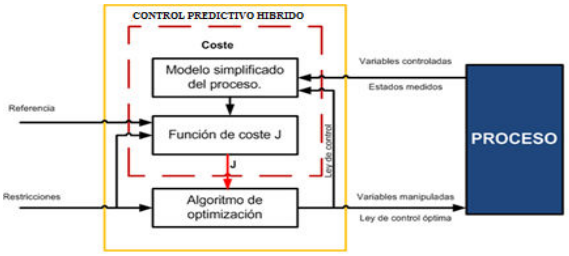


Figura 1: Estructura del controlador predictivo propuesto.

Finalmente para la implementación de este controlador se utilizó la herramienta de modelado y simulación de sistemas dinámicos orientada a objetos EcosimPro [2]. Como sistema de prueba se utilizó una versión a escala y reducida (benchmark) de las secciones de evaporación y cristalización de una factoría azucarera. La financiación de este trabajo proviene del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea [FP7/2007-2013] bajo acuerdo de subvención n° 257462 HYCON2 red de excelencia.[3]

El artículo está organizado de la siguiente manera; en la sección 2 se realiza una descripción detallada del objeto de estudio, posteriormente se describe la implementación del controlador predictivo, y finalmente, el artículo termina con las conclusiones y la bibliografía.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2 CASO DE ESTUDIO:PROCESO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR

La fase industrial del proceso de fabricación del azúcar a partir de la remolacha azucarera puede dividirse en dos grandes etapas o subprocesos: el Cuarto de Remolacha y el Cuarto de Azúcar. En el primero están comprendidas las etapas de Extracción o Difusión, de Depuración y la de Evaporación. Se trata, en esta primera parte, de aquellas etapas relacionadas con el jugo, que primero debe ser extraído de la remolacha troceada en la Difusión, que posteriormente deberá ser purificado en la medida de lo posible, en la etapa de Depuración, por último, pasa a una etapa de Evaporación en la que se aumenta la concentración de azúcar.

Por su parte la fase del Cuarto de Azúcar o sección de cristalizaciónpor es la encargada de elaborar el azúcar comercial en granos a partir del jarabe concentrado que le llega desde la Evaporación, además también entrega como un subproducto importante la melaza, el cual es enviado a una alcoholera para dar origen a otros productos útiles. En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso de fabricación.

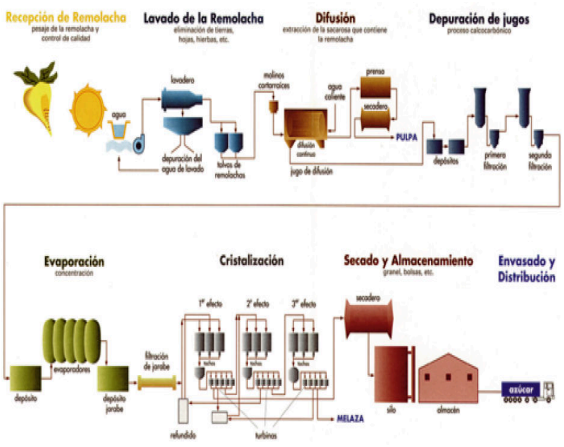


Figura 2: Proceso de elaboración del azúcar.

Desde el punto de vista de su automatización, la industria azucarera presenta características especiales que la hacen atractiva por la diversidad de procesos y problemas que presenta. Debido a que combina procesos continuos y batch, procesos lentos y rápidos y utiliza una gran variedad de operaciones unitarias [6], y desde el punto de vista económico el mayor consumo de vapor producido en calderas de alta presión, se produce en la Evaporación y en la primera etapa del Cuarto de Azúcar.Por otro lado dichos subprocesos están altamente conectados como se discutirá posteriormente.

En base a lo anteriormente expuesto se ha desarrollado una versión a escala y reducida (benchmark) de las secciones de evaporación y cristalización de una factoría azucarera como objeto de estudio, con la finalidad de implementamentar diferentes estrategias de control. Aunque el proceso propuesto es más pequeño que una fábrica real, el problema de control es muy significativo, debido a la gran interacción entre las secciones, la operación en modo continuo de la sección de evaporación y la operación semi-discontinuo en la cristalización. [5 y 6].

A continuación se describen en detalle cada una de las secciones que conforma nuestro objeto en estudio.

2.1 Sección de Evaporación

El principal objetivo de la sección de evaporación es la obtención de un jarabe con un Brix (cantidad de sólidos en porcentaje) elevado y lo más estable en el tiempo posible, mediante la evaporación del agua contenida en el jarabe. El vapor de salida de las turbinas, encargadas de producir energía eléctrica para el consumo de la fábrica o venta el exterior, se utiliza como fluido calefactor. Normalmente, los evaporadores se agrupan en cuatro o más efectos (un efecto es una cascada de evaporadores en el que el jugo fluye de uno a otro, pero utilizando la misma fuente de vapor).

Para el caso de estudio, cada efecto sólo contiene una evaporador y es una disposición de tres efecto (Fig. 3), en que el jugo circula en serie de un evaporador a otro, aumentando el grado de concentración del jugo (Brix) hasta un cierto valor. El primer evaporador recibe su vapor de calentamiento de las turbinas, pero el calentamiento de los otros evaporadores es proporcionado por el vapor producido en la anterior. El esquema es energéticamente eficiente en el sentido de que permite la reutilización múltiple del vapor que sale de las calderas de la fábrica. Es importante mencionar que parte del vapor producido en cada evaporador es redistribuido en la fábrica para cumplir con otra funciones tecnológicas. En particular, los consumidores más importantes del vapor generado por la sección de evaporación (vapor I y II) son los cristalizadores de azúcar.

En la sección de evaporación se dispone de reguladores PID para controlar el nivel del líquido en los evaporadores y depósitos de suministros, así como la presión del vapor al primer efecto y el Brix del jarabe producido. La consigna de estas últimas variables son una de las claves del manejo del proceso.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

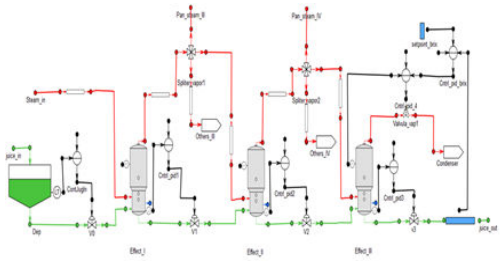


Figura 3: Sección de evaporación.

2.2 Sección de Cristalización

El azúcar con valor comercial se obtiene a partir de un esquema básico como el que se muestra en la Figura 4. En primer lugar se tiene una batería de cristalizadores discontinuos o tachas en los cuales se lleva a cabo el crecimiento de los cristales de azúcar, seguida de una centrífuga o turbina, encargada de separar los granos de azúcar de la miel en la que están embebidos.

El jarabe de alimentación de las tachas o licor estándar esta conformado a partir del jarabe concentrado proveniente de la evaporación, y de las contribuciones de otras mieles recicladas desde la misma etapa o desde otras posteriores, además de azúcar en grano de calidades inferiores que termina siendo redisuelto.

Entre las tachas y las centrífugas la masa cocida, producto obtenido de la cristalización, es almacenada en un depósito especialmente acondicionado llamado malaxador. Este depósito, aislado térmicamente y sometido a una adecuada agitación mecánica, es útil para adaptar las diferencias de velocidad de procesamiento entre las unidades batchs y continuas.

El nivel de este depósito está regulado usando un controlador de tipo PID que manipula el caudal de entrada a las centrifugas, con la restricción de conseguir una carga lo más uniforme posible.

En las tachas se logra la condición de sobresaturación necesaria para la cristalización por el procedimiento de eliminar la cantidad de agua mediante evaporación. La producción del azúcar se realiza haciendo crecer una población inicial de pequeños cristales, la llamada siembra, que es introducida en el momento adecuado de la evolución del ciclo de trabajo de la unidad. Para lograr una distribución final de tamaños de los cristales que sea la apropiada en cuanto a su dimensión promedio, a la dispersión de la distribución de tamaños y a la no existencia de falso grano y conglomerados, se intenta conducir el ciclo de trabajo de manera que la sobre-saturación se mantenga siempre dentro de

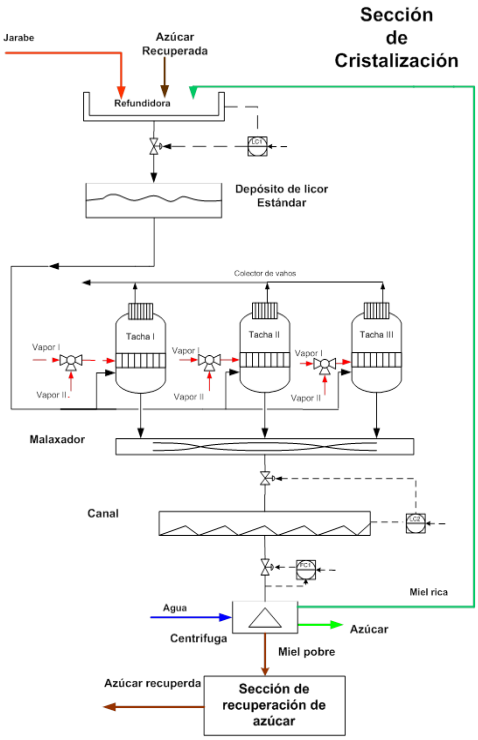


Figura 4: Sección de cristalización.

la zona meta-estable. Con ello se logrará que al final de la cocción, se cuente con aproximadamente la misma cantidad de granos de azúcar que los que fueron inicialmente introducidos en la siembra.

Finalmente en las centrifugas se separa la sacarosa cristalizada de la miel madre. Dado los requerimientos de calidad del azúcar blanco es necesario introducir agua y vapor a presión en alguna etapa del proceso de centrifugado para expulsar la casi totalidad de la miel madre que pudiera quedar adherida a la superficie de los cristales y que no puede ser separada por la fuerza centrífuga. Debido a esta característica de operación, las centrífugas descargan tres productos: El primero es la descarga de la miel pobre, obtenida en los primeros instantes del proceso, el siguiente es la descarga de miel rica, la cual tiene una mayor pureza

2.3 Problema de Control

El funcionamiento del proceso es complejo porque ambas secciones interactúan fuertemente en términos de flujo de masa y energía. Para un flujo de jugo que llega a la sección de evaporación, el jarabe producido en esta sección y las demandas de vapor depende de la consigna de vapor fresco, la consigna del controlador de brix, así como también las demandas de vapor en los cristalizadores.

Por su parte, en los cristalizadores el tiempo de ciclo y los perfiles caudales presentes en esta unidad,

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

dependen de la concentración y la pureza del jarabe de la evaporación, así como de la presión del vapor suministrado. La pureza se define como el porcentaje de sacarosa de los sólidos disueltos en el jarabe y afecta también al porcentaje de cristales obtenidos en un lote. El tiempo de ciclo determina la capacidad de procesamiento de jarabe de azúcar en la sección de cristalización, lo que obviamente limita al caudal máximo permisible de jarabe de la sección de evaporación.

Por otro lado, los cristalizadores deben tener una buena planificación, para evitar que se produzcan tanto grandes como escasas demandas de vapor y del jugo en la evaporación, así como también el vaciado y desbordamiento del depósito de licor estándar.

En base a lo anteriormente expuesto nos hemos propuesto como objetivo de control:

Procesar el jarabe procedente de la (sección de evaporación) evitando cuellos de botella en la producción. Este objetivo implica una adecuada planificación en la operación de las tachas, es decir, seleccionar adecuadamente el tiempo en que inicia la carga de cada una de las tachas, así como el uso adecuado de los recursos compartidos, evitando que el depósito de alimentación de licor estándar se llene o se vacíe completamente. Esto equivale a mantener el nivel de dicha unidad entre un mínimo y un máximo determinados.

3 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE CONTROL PROPUESTA

3.1 Modelo de Predicción

En sistemas complejos es muy importante que el modelo interno relacione las variables controladas y las variables manipuladas de manera más simple posible, consiguiendo a la vez una buena representación de la dinámica del proceso. Es decir obtener un modelo de predicción que se corresponda con el punto de vista y propósito de la optimización de planta completa. De acuerdo a esto, el modelo debe incluir solo aquellas variables y fenómenos relevantes para los objetivos de control anteriormente mencionados.[4]

El modelo de predicción desarrollado emplea para las unidades continuas los mismos modelos matemáticos que del sistema original, con algunas simplificaciones, estos modelos se basan en balances de materia globales, balances de materia parciales de contenido de sólidos y sacarosa.

Mientras que para el modelo de la unidades batch (cristalizadores de vacío o tachas) la única información requerida desde el punto de vista del controlador de planta completa, son los caudales de jugo y vapor demandados y el producto descargado, con todas sus principales características a lo largo del tiempo, todo ello en función de la presión de vapor, pureza y el brix de la alimentación Un modelo detallado de cada tacha basada en primeros principios involucrando balances de materia y energía, un modelo del crecimiento de los cristales, así como los modelos de todos los controladores locales y de secuenciación, podría resolver el problema, pero evidentemente, daría lugar a un inmenso modelo interno, completamente inadecuado para su uso por el controlador predictivo, dado su alta carga computacional.

Así, se ha desarrollado un modelo que contenga pocos parámetros y baja carga computacional. Este modelo es de tipo caja negra en el cual en que función de las condiciones de contornos, las condiciones iniciales, los balances de masa y energía totales y ecuaciones empíricas, como se calculan: los perfiles de los caudales: entrada de jugo ($W_{j,in}$), entrada de vapor($W_{vap,in}$), salida de masa cocida($W_{j,out}$) y vahos($W_{vahos,out}$). (ver Figura 5)

Figura 5: Modelo de la Tacha.

La Figura 6, se muestra los perfiles detallados de los caudales calculados con el modelo de las tachas.

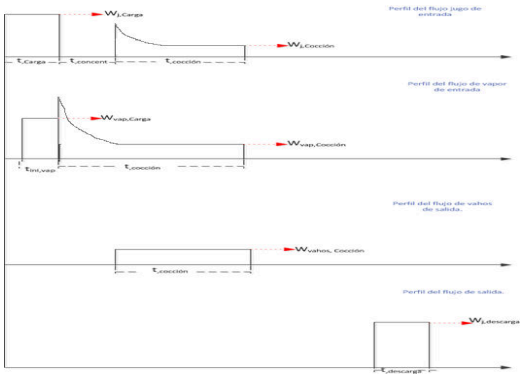


Figura 6: Perfiles de los caudales calculados con el modelo de las tachas.

Las ecuaciones matemáticas del modelo no se detallan en esta comunicación ya que trasciende del objetivo del mismo.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Finalmente es importante resaltar que las relaciones entre las unidades continuas y las unidades batch tienen lugar a través de los caudales de entrada y salida así como de sus propiedades como la pureza (P) y brix (B), siendo de interés secundario las dinámicas internas.

3.2 Estrategía de control

En este caso el problema de control consiste en encontrar la duración de las etapas en que cada uno de los cristalizadores está en espera de inicio de un nuevo lote. Parece lógico pensar que la mejor solución es aquella en que en estado estacionario los tres cristalizadores están perfectamente secuenciados en el tiempo, de modo que el segundo cristalizador empiece un tiempo más tarde del primero, dicho tiempo debe corresponder a un tercio de la suma del tiempo de procesamiento más el tiempo de espera. Lo mismo cabe esperarse del tercer cristalizador con respecto al segundo.

Por tanto el problema se reduce a calcular durante los primeros N_u ciclos (horizonte de control, tiempo durante el cual las acciones de control pueden variar y a partir del cual permanecen constantes) el valor de los tiempos de espera de cada cristalizador y además el valor del tiempo de espera de cada cristalizador en estado estacionario. Evidentemente para los cristalizadores 2 ($TA2$) y 3 ($TA3$) el último tiempo de espera antes de entrar en régimen estacionario se calculará para mantener la secuenciación estacionaria que antes se indicó.

A partir de la planificación calculada se simula el compartimiento del sistema durante N_p ciclos (horizonte de predicción, tiempo sobre el cual se evalúan las salidas del sistema). La función de coste que se va a usar en este caso mide la desviación media, a lo largo del horizonte de predicción, del nivel del depósito de licor estándar (N_{LS}) con respecto a una banda de operación $[N_{LS}^{min} \;\; y \;\; N_{LS}^{max}]$. Matemáticamente dicha función de coste puede ponerse como:

$$J = \frac{1}{T}\int_0^T e(t)^2 \cdot dt \tag{1}$$

Donde T es el tiempo correspondiente a la ejecución de N_p ciclos de cada cristalizador y $e(t)$:

$$e(t)=\begin{cases} \frac{N_{LS}-N_{LS}^{min}}{N_{LS}^{min}} & \text{si} \quad N_{LS}\leq N_{LS}^{min} \\ 0 \quad \text{si} & N_{LS}^{min}<N_{LS}<N_{LS}^{max} \\ \frac{Nivel_{LS}-Nivel_{LS}^{max}}{(100-Nivel_{LS}^{max})} & \text{si} \quad N_{LS}\geq N_{LS}^{max} \end{cases} \tag{2}$$

Para facilitar la tarea del optimizador, y que las matrices de cálculo estén bien condicionadas, se procede a normalizar los tiempos de espera de modo que las variables de decisión estén en el rango $[0, 1]$. Como puede verse en la ecuación adjunta, también se usa un índice normalizado para medir el comportamiento del proceso. Finalmente se debe indicar que también se establecen límites en las variables de decisión, de modo que se limita el espacio de búsqueda a un conjunto de soluciones coherentes.

Por tanto los parámetros de sintonía del controlador son los valores de los horizontes de predicción y control, medidos en términos de ciclos de operación de los cristalizadores, así como los límites en las variables de decisión.

3.3 Implementación.

Para implementar el control predictivo se utilizó la herramienta de modelo orientada a objetos EcosimPro[2]. En primer lugar se ha creado una librería que contiene dos componentes *coste.el* y *control.el*. El componente **coste.el**, recibe como entrada los valores de las variables manipuladas (los tiempos de espera de carga de las tachas), la perturbación medible (flujo, pureza, brix del jugo de entrada) los estados y la variable controlada (nivel del depósito de licor estándar), y en base a esto calcula la función de coste (J). El archivo *control.el* recoge el valor de la función objetivo y lleva a cabo la optimización utilizando la librería de optimización SNOPT [7], y propone las nuevas acciones de control a aplicar (u)

Se han realizado distintas simulaciones para comprobar el funcionamiento del controlador desarrollado. En concreto se presentan dos (2) experimentos (A, B), tal y como se muestra en la Tabla 1.En el primer experimento (A) corresponde a una situación nominal del proceso y en el segundo (B) se ha incrementado un 15 % la cantidad de jugo a procesar. Todos los casos se corresponden también con una puesta en marcha parcial de todo el cuarto de azúcar, pues aunque las unidades continuas ya tienen un nivel inicial de producto, todas las unidades batch arrancan completamente vacías.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Tabla 1: Características de los experimentos realizados en simulación.

Características diferentes de las simulaciones.		
A	Figuras 7 y 9	Perturbaciones fijas y constantes en W_{JE}, P_{JE} y B_{JE}
B	Figuras 8 y 10	Aumento del 15 % en W_{JE}, y se mantienen constantes P_{JE} y B_{JE}
Características iguales de las simulaciones.		
Horizonte de Predicción.		7*ciclos*
Horizonte de control.		3*ciclos*
Variables de decisión.		7
Tiempo de muestreo.		1*h*
Duración.		72*h*
Mismos estados iniciales en todas las variables		

En las Figuras 7 y 8, se puede observar el buen comportamiento y la periodicidad alcanzada en todos los niveles. El nivel controlado se encuentro dentro de los límites físicos del sistema, cumpliéndose así el objetivo de control propuesto. El controlador es capaz de gestionar todas las unidades de manera óptima, incluyendo la puesta en marcha de toda la sección.

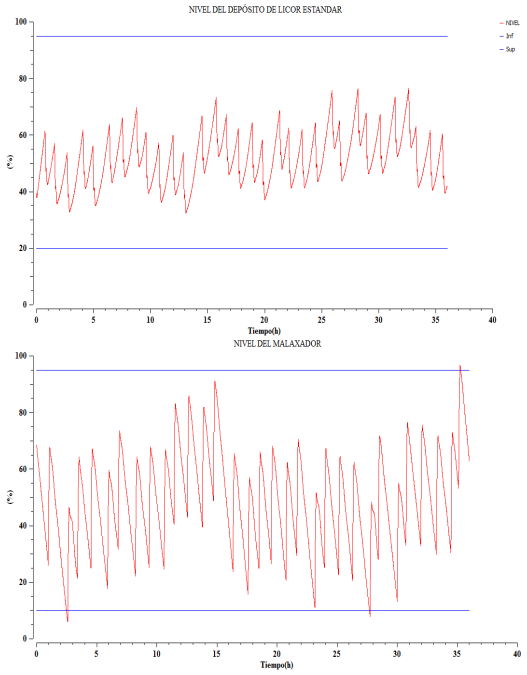


Figura 7: Nivel del depósito de licor estándar y malaxador para el experimento A.

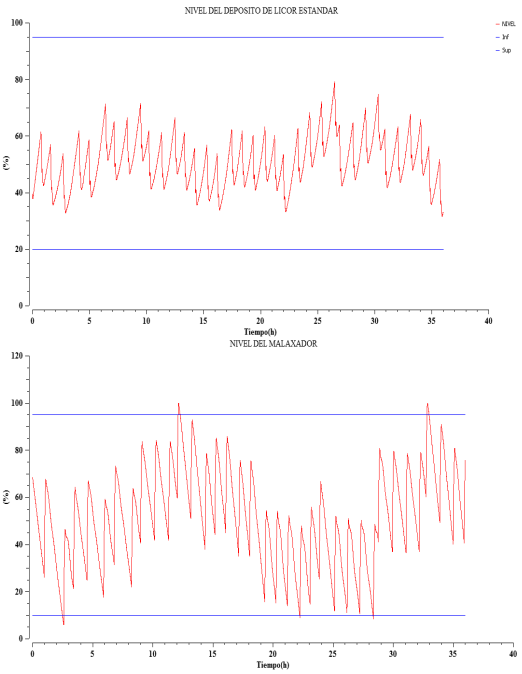


Figura 8: Nivel del depósito de licor estándar y malaxador para el experimento B.

En las Figuras 9 y 10 se muestran los caudal de la salida a las centrifugas y de entrada a la sección de evaporación. En ella se observa que el controlador PID no tiene un funcionamiento adecuado debido al gran retraso que tiene el sistema, pero la respuesta del caudal controlado que se envia a centrifugas es consecuente al caudal de jugo de entrada a la evaporación ($W_{j,in}$).

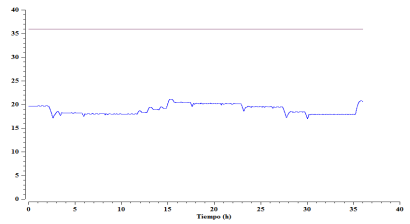


Figura 9: Perfil del caudal de entra a: la evaporación y centrifugas para el experimento A.

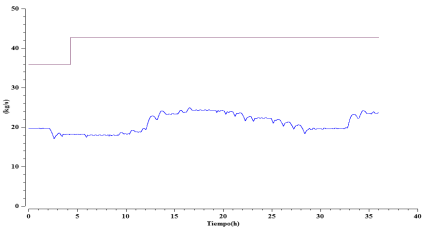


Figura 10: Perfil del caudal de entra a: la evaporación y centrifugas para el experimento B.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Finalmente en la Figura 11 se muestran los tiempos de espera de carga de cada una de las tachas, de la cual se puede concluir que los tiempos tiende a disminuir para hacer frente al efecto producido al aumentar el flujo del jugo de entrada a la evaporación.

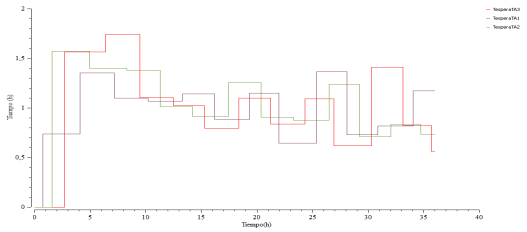


Figura 11: Tiempo de espera de carga de cada cristalizador.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha implementado un controlador predictivo basado en un modelo de conocimiento para la planificación de procesos por lotes de una versión a escala y reducida de las secciones de evaporación y cristalización de una fábrica de azúcar de remolacha típica. Se hicieron diversas pruebas para verificar el funcionamiento del controlador, obteniendose resultados satisfactorios, los cuales garantizan que se ha cumplido con el objetivo de control propuesto.

Como trabajo futuro se pretende hacer una extensión al problema de control, añadiendo nuevas variabls de decisión y nuevas funciones objetivos tales como: minimizar el consumo de energía y maximar la producción, y evaluando diferentes tipos de arquitecturas de control de naturaleza descentralizada.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Séptimo Programa Marco de la Unión Europea [FP7/2007-2013] bajo acuerdo de subvención n° 257462 HYCON2 red de excelencia por el financiamiento de este proyecto.

Referencias

[1] Camacho, F., Bordons, C., (2004), "Control predictivo: pasado, presente y futuro". 2004 CEA-IFAC.

[2] EcosimPro by EA Internacional, Dynamic Modeling and Simulation Tool, [Online] http://www.ecosimpro.com/ Último acceso: Junio de 2014.

[3] HYCON2. Highly-complex and networked control systems: http://www.hycon2.eu, [visitado en Junio 2014].

[4] Rodríguez A, Acebes L.F., Prada C., (2010). Empirical and simplified models for an industrial batch process. European Modeling and Simulation Symposium (EMSS): Octubre 13-15, 2010, Fes, Marrueco.

[5] Rodríguez A, Acebes L.F., Prada C., (2010). Empirical and simplified models for an industrial batch process. European Modeling and Simulation Symposium (EMSS): Octubre 13-15, 2010, Fes, Marrueco.

[6] Rodríguez A,R. Mazaeda, A. Merino, L.F. Acebes, C. de Prada, (2011). Descripción de un benchmark para algoritmo de planificación y control de grandes sistemas: Septimebre 3-5, 2011, Sevilla, España.

[7] SNOPT, Software for Large-Scale Nonlinear Programming.http://www.sbsi-sol-optimize.com/,[visitado en Junio 2014].

[8] Van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T., (1998). Sugar Techonology: Beet and Cane Sugar Manufacture.Ed.Bartens.Berlín.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS MÓVILES UTILIZANDO UN ESCÁNER LÁSER MEDIANTE FILTROS DE KALMAN

Marc Bosch-Jorge, Ángel Soriano, Ángel Valera, Antonio-José Sánchez-Salmerón
e-mail: {mbosch, ansovi, giuprog, asanchez,}@ai2.upv.es
Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial
Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España

Resumen

En el presente trabajo se expone la implementación de un algoritmo de detección y seguimiento de objetos mediante un escáner láser. El objetivo de este algoritmo es determinar los objetos que se encuentran alrededor del sensor y determinar sus movimientos para poder llevar a cabo una navegación de forma segura. El algoritmo implementado primero divide el haz láser en diferentes segmentos. Posteriormente se realiza un emparejamiento de los segmentos ente dos capturas consecutivas. Se ha utilizado un filtro de Kalman para realizar el seguimiento de los segmentos en movimiento y predecir su posición futura, de manera que se pueda realizar un emparejamiento efectivo.

Palabras clave: filtro de kalman, sensor láser, segmentación, robot móvil, seguimiento de objetos

1. INTRODUCCIÓN

Un robot móvil debe de conocer la posición de los objetos a su alrededor para que se pueda mover por su entorno de forma segura sin provocar colisiones. Estos objetos puede ser fijos, tales como paredes o mobiliario, o bien ser móviles, como otros robots o personas. En el caso de los objetos móviles, además de conocer la posición de los mismos resulta muy interesante conocer el movimiento que han seguido y estimar cuales van a sus movimientos futuros.

Para analizar el entorno y determinar los objetos es necesario que el robot cuente con un sistema de sensorización adecuado a las características de los movimientos que va a realizar, así como de los objetos que pueda haber a su alrededor. En el caso de este trabajo, las características necesarias son:

- precisión,
- gran campo de visión,
- alta resolución temporal,
- alta resolución espacial.

De los distintos tipos de sensores existentes, los que más se adecúan a estas características son los sensores láser LRF (Laser Range Finder). Este tipo de sensores son capaces de medir la distancia que hay entre el sensor y los objetos que se encuentran a su alrededor. El sensor proyecta un haz láser en un arco alrededor suyo y mide el tiempo que tarda en el láser tarda en volver al sensor. De esta manera el sensor es capaz de medir la distancia a los objetos más próximos que se encuentren dentro del campo de acción del sensor. Su radio de acción depende del rango angular, así como de la distancia máxima y mínima que puede medir el sensor. Para el caso de robots móviles se suelen utilizar sensores que presentan un ángulo de visión de más de 180º, una distancia máxima que depende del entorno en el que se va a mover el sensor. En caso de interiores la distancia máxima necesaria se encuentra dentro del orden de los 5 metros, mientras que para exteriores la distancia máxima requerida es mucho mayor, de alrededor de 30 metros como mínimo.

Existen en la literatura trabajos relativos al uso de sensores láser en robots móviles. Podemos encontrar trabajos relacionados con la segmentación del láser y la extracción de primitivas geométricas, como [12] y [10]. Otros trabajos se centran en la construcción de mapas, como [6], o en la localización en escenarios conocidos, como [15]. Por último, diferentes trabajos están relacionados con el seguimiento de objetos, como por ejemplo [11], de personas, como [7].

Nuestro trabajo se basa en dividir la captura del sensor láser en diferentes segmentos, que se corresponden con los objetos detectados por el sensor en un instante determinado. Los segmentos detectados en el instante actual son emparejados con los objetos detectados previamente por el sensor. Se aplica un algoritmo de seguimiento basado en un filtro de Kalman para determinar el movimiento de los objetos del entorno, de manera que se pueda extraer la trayectoria seguida durante su detección y poder realizar un mejor emparejamiento entre segmentos y objetos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2. FILTRO DE KALMAN

El filtro de Kalman [4], [9] es un algoritmo que se utiliza para estimar el estado de un proceso lineal a lo largo del tiempo. El estado viene definido por un conjunto de variables, que pueden ser observables o no, y del error asociado a cada una de ellas, en forma de covarianza.

Su funcionamiento se basa en dos fases distintas: la fase de predicción y la fase de actualización. En la fase de predicción el filtro predice, a partir del estado actual, cual va a ser el estado siguiente. En la segunda fase, el filtro mide el estado actual del proceso y realiza una corrección de la predicción hecha previamente.

A continuación se muestra el filtro de Kalman en formato matricial. (1) se corresponde con la fase de predicción del filtro, mientras que (2) se corresponde con la fase de actualización.

$$Predicción: \begin{array}{l} \tilde{x}_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \\ \tilde{P}_k = AP_{k-1}A^t + Q \end{array} \quad (1)$$

$$Actualización: \begin{array}{r} \tilde{y}_k = z_k - H\tilde{x}_k \\ S = H\tilde{P}_k H^t + R \\ K = \tilde{P}_k H^t S^{-1} \\ x_k = \tilde{x}_k + K\tilde{y}_k \\ P_k = (I - KH)\tilde{P}_k \end{array} \quad (2)$$

En esta formulación, el subíndice k indica el instante del tiempo. $x_k \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado y $u_k \in \mathbb{R}^u$ es el vector de control. $A \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de transición, que permite predecir el estado siguiente a partir del actual. $B \in \mathbb{R}^{nxu}$ es la matriz de control, que modela los cambios producidos en el sistema al aplicar la acción de control u_k. $P_k \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de covarianza, que determina el error del proceso en el instante actual. $Q_k \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de covarianza modelo del error del proceso. $\tilde{x}_k \in \mathbb{R}^n$ y $\tilde{P}_k \in \mathbb{R}^{nxn}$ son las predicciones hechas por el filtro del vector de estado y la matriz de covarianza respectivamente.

$z_k \in \mathbb{R}^m$ es el vector de medidas, $H \in \mathbb{R}^{mxn}$ es la matriz de observación, que relaciona el estado del proceso con las medidas. $y_k \in \mathbb{R}^m$ es la innovación o diferencia entre la medición real y la medición predicha por el filtro. $S \in \mathbb{R}^{mxm}$ es la covarianza de la innovación del filtro. $R \in \mathbb{R}^{mxm}$ es la matriz de covarianza modelo del error de la medición. $K \in \mathbb{R}^{nxm}$ es la ganancia óptima del filtro. $I \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz identidad de tamaño nxn.

Por lo tanto, el filtro de Kalman se modela determinando los vectores de estado x_k, de control u_k y de medición z_k, y las matrices de transición A, de control B, de observación H, de covarianza del proceso Q y de covarianza de la medición R. La inicialización se realiza simplemente asignando valores al vector de estado x_1 y a la matriz de covarianza P_1.

Como se ha dicho, el filtro de Kalman está diseñado para utilizarse con sistemas lineales. Existen mejoras al filtro de Kalman enfocadas para a ser utilizadas en sistemas no lineales. Las más utilizadas son el filtro de Kalman Extendido [17] y el filtro de Kalman Unscented [5].

3. SEGMENTACIÓN

Primero se deben determinar los objetos que hay presentes en el entorno. Esto se consigue mediante la segmentación de la captura del sensor láser. Cada uno de estos segmentos resultantes se corresponde con un objeto distinto. El proceso básico de la segmentación consiste en determinar los puntos de ruptura existentes en la captura del sensor. Un punto de ruptura es aquel que presenta una discontinuidad en sus características con el siguiente punto de la captura, de manera que ambos puntos forman parte de dos segmentos distintos. Como se puede ver en [12], existen dos aproximaciones distintas para determinar estos puntos.

La primera de ellas está basada en la distancia entre puntos consecutivos de la captura. Si esta distancia supera un umbral, se considera que entre los dos puntos existe un punto de ruptura. Este umbral puede ser fijo para todos los puntos, independientemente de la distancia a la que se encuentre el objeto. Sin embargo establecer un límite fijo puede producir problemas de sobresegmentación si el límite es demasiado bajo, de manera que los objetos más lejanos serán divididos en diferentes segmentos, o de subsegmentación si el límite es demasiado grande, de manera que los objetos más cercanos serán agrupados en un único objeto. Para solucionar este problema, se utilizan diferentes algoritmos que establecen un límite adaptativo en función de la distancia a la que se encuentra el objeto. Trabajos que utilizan límites adaptativos son [3], [8], [16] y [2]. Este algoritmo se muestra en pseudocódigo en el algoritmo 1.

La segunda forma de abordar el problema de la segmentación se basa en utilizar un filtro de Kalman. Esta aproximación asume que los puntos que forman parte del mismo segmento han sido generados por un proceso dinámico contínuo. Los puntos del captura del sensor se utilizan como entrada para del filtro de Kalman. Los puntos de ruptura son aquellos que el filtro determina que son outliers, es decir, no cumplen con las características del proce-

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Entrada: P = Puntos del escaneado láser
Salida: Q = Puntos de ruptura
Inicialización:
$Q = \{\}$
para $i = 1$ **a** $N - 1$ **hacer**
  si $distancia(P_i, P_{i+1}) > umbral$ **entonces**
    $Q.añade(i)$
    $Q.añade(i + 1)$
    $i += 1$
  fin
fin
Algoritmo 1: Algoritmo de segmentado mediante distancia

so dinámico estimado. Se considera que un punto no pertenece al proceso estimado si cuando es procesado por el filtro, la varianza de la innovación S no es capaz de pasar el test de χ^2. [2] utiliza un filtro de Kalman, mientras que [14] y [1] utilizan un filtro de Kalman extendido. Este algoritmo se muestra en pseudocódigo en el algoritmo 2.

Entrada: P = Puntos del escaneado láser
Salida: Q = Puntos de ruptura
Inicialización:
$Q = \{\}$
$KF.inicialización(P_1)$
para $i = 1$ **a** $N - 1$ **hacer**
  $KF.predicción()$
  si $test_\chi^2(KF.S) == Falso$ **entonces**
    $Q.añade(i)$
    $Q.añade(i + 1)$
    $i += 1$
    $KF.inicialización(P_i)$
  en otro caso
    $KF.actualización()$
  fin
fin
Algoritmo 2: Algoritmo de segmentado mediante filtro de Kalman

En la figura 1 se puede ver una muestra de un escaneado realizado por el láser. Los puntos azules representan los objetos detectados por el láser, mientras que los círculos rojos representan los puntos de ruptura calculados mediante el algoritmo propuesto por [8]. El cuadrado en el centro representa la posición del sensor. El área de color gris claro representa el área cubierta por el láser, mientras que el color gris oscuro representa el área fuera del alcance del láser.

4. EMPAREJAMIENTO

El emparejamiento entre diferentes capturas del láser se realiza mediante una simple comparación de distancia entre segmentos. La comparación se realiza todos contra todos, es decir, se calcula la

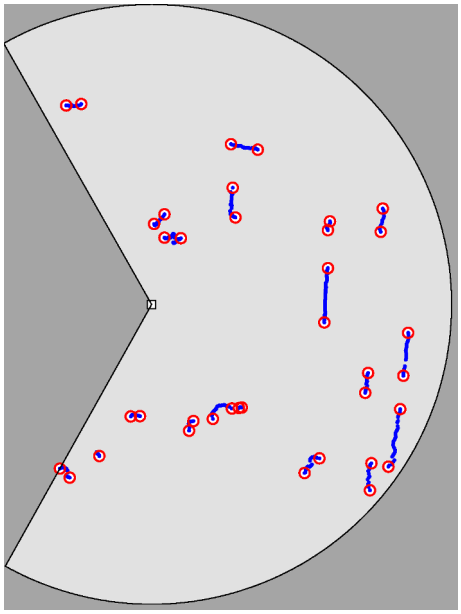


Figura 1: Captura del sensor láser.

distancia de cada segmento del la nueva captura con los segmentos de la captura previa. Se ha tomado la distancia entre centroides como medida de la distancia entre segmentos. El centroide de un segmento se ha definido como la media entre sus coordenadas x e y. Una vez calculadas las distancias entre segmentos, estas se ordenan de menor a mayor. El emparejamiento se realiza uno a uno, es decir, a cada objeto se le asigna un único segmento nuevo, mientras que cada segmento nuevo sólo puede ser asignado a un objeto. Los segmentos que no son asignados a ningún objeto generan nuevos objetos en la iteración actual del sistema. Durante la primera iteración del sistema no existe ningún objeto previo, por lo que cada segmento crea su propio objeto asociado. Este algoritmo se puede ver en pseudocódigo en el algoritmo 3.

5. SEGUIMIENTO

Un filtro de Kalman realiza el seguimiento de cada objeto.

El estado de cada objeto se ha modelado según la posición y velocidad de su centroide en el espacio de coordenadas cartersianas. Mediante el escáner láser podemos medir la posición de los segmentos, por lo que esta conforma la parte observable del sistema. En cambio, la velocidad sólo puede ser estimada realizando el seguimiento de los objetos a lo largo del tiempo, por lo que conforma la parte no observable del sistema. Por lo tanto, el vector de estado queda $x_k = (x, y, \dot{x}, \dot{y})$ y el vector de observación $z_k = (x, y)$.

A continuación se definen las diferentes matrices

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Entrada: Objetos, Segmentos
Salida: Objetos
Datos: $D = [(d, Objeto, Segmento)]$
para $O \in Objetos$ **hacer**
  para $S \in Segmentos$ **hacer**
    $d = distancia(O, S)$;
    $D.añade(d, O, S)$;
  fin
fin
Ordenar D de menor a mayor según d;
para $(d, Objeto, Segmento) \in D$ **hacer**
  si *visitado(Objeto) == Falso* ***y*** *visitado(Segmento) == Falso* **entonces**
    $visitado(Objeto) = Verdadero$
    $visitado(Segmento) = Verdadero$
    $Objeto.añade(S)$
  fin
fin
para $S \in Segmentos$ **hacer**
  si *visitado(Segmento) == Falso* **entonces**
    $visitado(Segmento) = Verdadero$
    $Objetos.creaObjeto(Segmento)$
  fin
fin

Algoritmo 3: Algoritmo de emparejamiento

de la formulación del filtro de Kalman expuesto en (1) y (2):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

La matriz Q se utiliza para modelar el comportamiento de los objetos que se van a seguir. Valores bajos de esta matriz permiten seguir de forma suave objetos que se muevan despacio, mientras que valores altos permiten seguir objetos más rápidos, aunque el seguimiento será más abrupto. Por otro lado, la matriz R modela el error en la medición, por lo que esta depende del error del sensor láser.

Gracias a la fase de predicción del filtro de Kalman podemos estimar cual va a ser la posición en el instante actual de un objeto existente en el sistema. Por lo tanto, como paso previo al emparejamiento entre segmentos y objetos, se aplica una traslación de los objetos existentes a su posición actual estimada para mejorar los resultados del emparejamiento.

6. IMPLEMENTACIÓN

El algoritmo final implementado es el que se muestra en el algoritmo 4.

Datos: *Objetos*
$Objetos \leftarrow \{\}$
mientras
  $Escaneado \leftarrow laser()$
  $Segmentos \leftarrow segmentar(Escaneado)$
  $Segmentos.filtrado_de_tamaño()$
  $Objetos.estimar_posición()$
  $Objetos \leftarrow emparejar(Objetos, Segmentos)$
  $Objetos.filtrado_por_antigüedad()$
fin

Algoritmo 4: Algoritmo de detección y seguimiento

Como se puede ver en el algoritmo, el proceso consiste en segmentar la captura del láser, predecir el movimiento de los objetos previamente detectados y realizar el emparejamiento con los segmentos del instante actual. Para mejorar la ejecución del algoritmo, como paso posterior al segmentado se eliminan aquellos segmentos que poseen un tamaño demasiado pequeño, y como paso posterior al emparejamiento se eliminan aquellos objetos que no han sido actualizados durante los últimos segundos.

El sistema se ha implementado sobre el robot Summit XL (figura 2). Este robot ha sido desarrollado por la empresa Robotnik. Se trata de una plataforma móvil en configuración diferencial basada en cuatro motores brushless independientes. Tiene un peso aproximado de 30Kg, soporta una carga máxima de 20Kg adicionales, alcanza una velocidad máxima de 3m/s y tiene una autonomía de 180 minutos. Dispone de un ordenador empotrado con un procesador Intel Atom CPU N2800 a 1.86GHz, una memoria DDR3 de 2GB y un disco duro de estado sólido de 128GB. Ofrece las conexiones típicas de una placa mini ITX como son puertos USB, Ethernet, salida VGA y HDMI e incorpora también un router configurado como punto de acceso para conectarse al robot vía WiFi. El sistema operativo que viene de fábrica es un Linux Ubuntu 12.04 LTS. El robot está integrado completamente en ROS [13].

El sensor láser utilizado es un Hokuyo URG-04LX-UG01. Este láser puede detectar objetos que se encuentran a una distancia entre 20 mm y 4000 mm. Tiene un ángulo de visión de aproximadamente 240º y y una resolución angular de aproximadamente 0.36º, lo cual produce capturas de 679 puntos. La frecuencia de captura del sensor es de 10Hz. El error de las distancias medidas depende de la distancia a la que se encuentre el objeto. Si

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

este se encuentra a menos de 1000 mm, la distancia medida tiene un error de ± 30 mm, mientras que para distancias superiores el error es del 3 % de la medida.

Ya que el robot está perfectamente integrado en ROS, esta ha sido la plataforma sobre la que se ha implementado el sistema descrito en este trabajo.

Cada una de las partes del algoritmo se ha implementado utilizando un nodo ROS distinto. Existe un nodo que realiza la captura del sensor láser, otro nodo que realiza la segmentación y por último uno nodo que realiza el seguimiento de los objetos y el emparejamiento. La comunicación entre nodos se ha realizado mediante topics ROS. Se ha definido un nuevo tipo de mensaje llamado "SegmentedLaserScan"que permite enviar a través de ROS capturas de láser segmentadas.

La visualización se ha realizado en RViz. Se ha implementado un plugin de visualización para el nuevo tipo de mensajes "SegmentedLaserScan". El resultado de su ejecución puede verse en la figura 3. El área de color blanco es la zona de alcance del sensor. El área de color gris es el área no cubierta por el láser. Los objetos están numerados y cada uno se representa con un color distinto. Los objetos 1, 2, 3, 4, 6 y 7 permanecen quietos, mientras que el objeto 5 está en movimiento. El objeto 5 empieza en el centro, primero se mueve hacia un lado y luego hacia el otro. El objeto 6 desaparece en la imagen intermedia debido a que es ocultado por el objeto 5. Sin embargo, en la última imagen se aprecia como vuelve a ser asignado al objeto número 6. En la figura 4 puede verse el grafo de comunicación entre nodos.

Figura 2: Robot Summit XL.

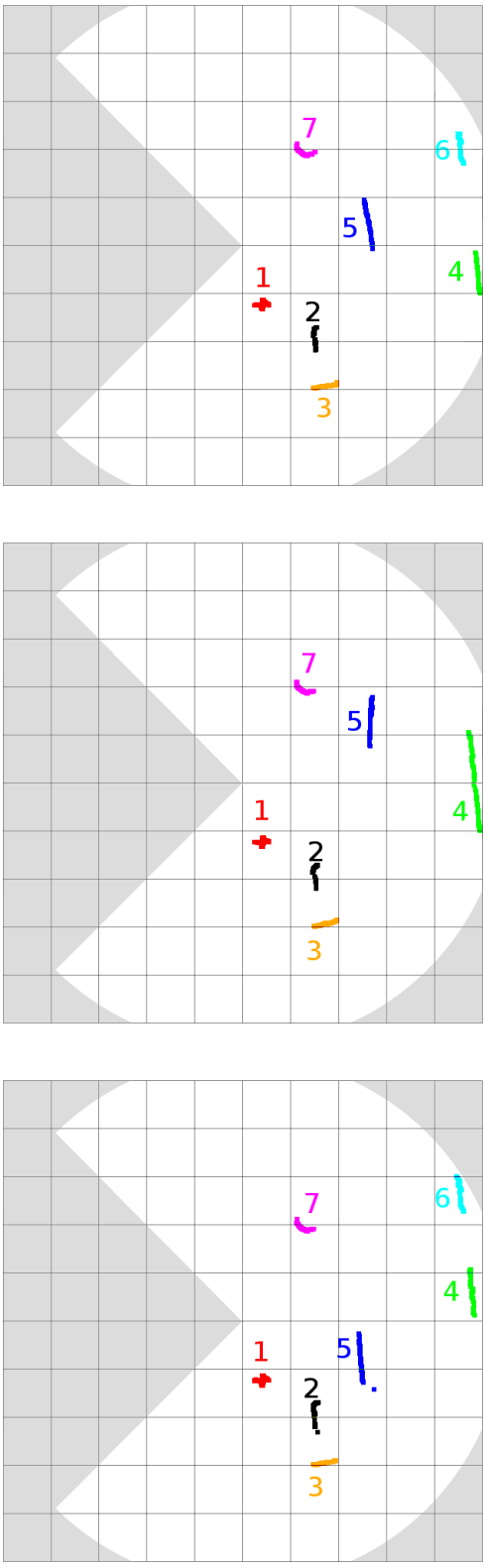


Figura 3: Visualización del algoritmo de seguimiento de objetos.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

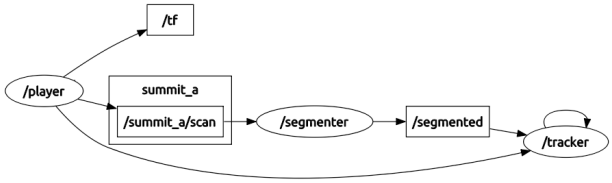


Figura 4: Grafo de comunicación entre nodos.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un sistema de detección y seguimiento de objetos en sensores láser mediante filtros de Kalman. El sistema funciona partir de la segmentación de los datos del sensor, que permite determinar el número de objetos presentes en el entorno. La posición de cada uno de estos objetos sirve como entrada para un filtro de Kalman, que permite estimar su velocidad. Los objetos detectados previamente son trasladados a la posición predicha en el instante actual por el filtro, y se emparejan con los segmentos detectados en el instante actual. Aquellos segmentos que no se emparejan con ningún objeto previo generan un nuevo objeto en el sistema. Aquellos objetos que no se emparejan con ningún segmento durante un periodo de tiempo determinado son eliminados del sistema. La implementación se ha realizado utilizando el middleware ROS y la visualización ha sido desarrollada mediante RViz.

Como trabajo futuro queda el realizar el seguimiento de objetos que presenten movimientos no lineales. Para ello, se espera implementar el seguimiento de objetos mediante un filtro de Kalman no lineal, como puede ser el filtro de Kalman Extendido o el filtro de Kalman Unscented. Además, se quiere realizar una clasificación de los objetos dependiendo de su forma y del movimiento que presentan, con el fin último de distinguir las personas que se encuentren en el entorno del robot y determinar su trayectoria.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad España por la financiación parcial de este trabajo bajo los proyectos de investigación DPI2011-28507-C02-01 y DPI2013-44227-R

Referencias

[1] M. D. Adams. On-line gradient based surface discontinuity detection for outdoor scanning range sensors. In *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 1726–1731. IEEE, 2001.

[2] G. A. Borges and M.-J. Aldon. Line extraction in 2d range images for mobile robotics. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 40(3):267–297, 2004.

[3] K. C. Dietmayer, J. Sparbert, and D. Streller. Model based object classification and object tracking in traffic scenes from range images. In *Proceedings of IV IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2001.

[4] M. S. Grewal and A. P. Andrews. *Kalman filtering: theory and practice using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2011.

[5] S. J. Julier and J. K. Uhlmann. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems. In *Int. symp. aerospace/defense sensing, simul. and controls*, volume 3, pages 3–2. Orlando, FL, 1997.

[6] S. Kohlbrecher, O. Von Stryk, J. Meyer, and U. Klingauf. A flexible and scalable slam system with full 3d motion estimation. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 155–160. IEEE, 2011.

[7] J. H. Lee, T. Tsubouchi, K. Yamamoto, and S. Egawa. People tracking using a robot in motion with laser range finder. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2936–2942. Ieee, 2006.

[8] K. J. Lee. *Reactive navigation for an outdoor autonomous vehicle*. PhD thesis, Master Thesis, 2001.

[9] L. Marín, M. Vallés, Á. Valera, and P. Albertos. Mejora en la navegación de robots con recursos limitados mediante fusión de datos de distintos sensores. *XXXII Jornadas Automatica SEVILLA*, 2011.

[10] V. Nguyen, S. Gächter, A. Martinelli, N. Tomatis, and R. Siegwart. A comparison of line extraction algorithms using 2D range data for indoor mobile robotics. *Autonomous Robots*, 23(2):97–111, June 2007.

[11] B. K. C. K. E. Prassler. Fast and robust tracking of multiple moving objects with a laser range finder. 2001.

[12] C. Premebida. Segmentation and geometric primitives extraction from 2D laser range data for mobile robot applications. In *Robotica*

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

2005 Scientific meeting of the 5th National Robotics Festival, pages 17–25, 2005.

[13] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng. Ros: an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5, 2009.

[14] S. I. Roumeliotis and G. A. Bekey. Segments: A layered, dual-kalman filter algorithm for indoor feature extraction. In *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 454–461. IEEE, 2000.

[15] C. Sánchez, A. Soriano, M. Vallés, E. Vendrell, and A. Valera. : Geometrical matching analytical algorithm for fast mobile robots global self-localization. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(6):855–863, 2014.

[16] S. Santos, J. E. Faria, F. Soares, R. Araújo, and U. Nunes. Tracking of multi-obstacles with laser range data for autonomous vehicles. In *Proc. 3rd National Festival of Robotics Scientific Meeting (ROBOTICA)*, pages 59–65, 2003.

[17] D. Simon. *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons, 2006.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Control of a Quadruple Tank Process using a Mixed Economic and Standard MPC

Adrià Soldevila, Julen Cayero, Jean Carlo Salazar, Damiano Rotondo and Vicenç Puig
Automatic Control Department (ESAII), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),
Rambla Sant Nebridi 10, 08222 Terrassa (Spain)

Abstract

This work presents a controller for a non-linear four-tank process as a solution of the CIC 2014 contest organized by the Comité Español de Automática. Along the paper we derive a Model Predictive control law that integrates Economic Model Predictive Control strategy with the standard quadratic Model Predictive Control approach. The resulting controller avoids convergence problems and demonstrates to be an easily computable solution that achieves the contest requirements.

Keywords: Non-linear Control, Model Predictive Control.

1 Introduction

Model predictive control (MPC) has become a standard control method when dealing with the regulation or reference tracking of large-scale multivariable plants under performance specifications [9]. When applied to linear unconstrained systems, MPC reduces to the linear quadratic control (LQR) [4]. On the other hand, MPC has evolved to consider more complex systems as multivariable non-linear constrained plants [5]. In spite of its applicability to such complex plants, the research is not completely closed, and several efforts have been made to ensure the convergence of the methods. In [8], a complete survey of the subject is provided where several conditions for an MPC algorithm to be closed-loop stable are presented.

In recent years, a new paradigm has appeared in the MPC field that considers an economic optimal control problem [10]. Economic model predictive control (EMPC) can be seen as a generalization of the standard MPC. Recently, it has been proved mathematically that the average performance of EMPC is never worse than the optimal steady state system operation [1].

In the EMPC, the optimal path for the variables of the system is not known and as a consequence, the tracking formulation cannot be directly applied. The economic problem is related to the time evolution of a set of exogenous parameters that appears explicitly in the cost function to be optimized, and these parameters are strictly related with economic or energetic issues. In the general case, the cost function is not convex and to guarantee the convergence of the system to the optimal point of operation, that minimizes the cost function, is not trivial because this point is not known a priori and may be non-stationary. Recently, stability results using Lyapunov functions for the economic MPC have been demonstrated under the addition of terminal constraints [2]. These ideas have been used and extended to deal with changes of the economic parameters [3] and have been generalised in [1].

Recent works dealing with EMPC stablish the importance of the dissipativity property in the convergence proof. Dissipativity has been stated in [1] as a sufficient condition to conclude optimality of the steady state operation. This fact motivates further research about this topic. In [6], it is demonstrated that a system that presents turnpike and some soft controllability properties under an MPC law without extra terminal conditions is closed-loop stable and converges near to the optimal point. Some works stated the relation between dissipativity and turnpike[1].

The CIC 2014 consists in designing a discrete-time controller for a non-linear and non-minimum phase quadruple tank system described as benchmark in [7], that minimizes a meaningful economic non-linear cost function, under constraints in the states and the inputs. With this purpose, the authors present in this paper a low computational cost model predictive controller that uses a modified cost function that ensures convergence of the system to the optimal path. This is achieved by adding to the proposed economic cost function a new control objective based on a standard quadratic tracking cost and a smooth switching mechanism. In this way, the continuity of the gradient is preserved and the convergence to the optimal steady state achieved without the necessity of using large prediction horizons.

This article is structured as follows. In Section 2,

[1] http://num.math.uni-bayreuth.de/en/publications/2014/gruene_stieler_Lyapunov_EMPC_2014/index.html

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

a description of the contest is presented, and the quadruple tank model as well as the control goal are introduced. Section 3 defines the controller design solution and its properties. Section 4 presents the tuning parameters. In Section 5, the results are presented and discussed. Finally, Section 6 draws the conclusions.

2 Contest Description

The CIC contest is organized annually by the Comité Español de Automática since 2007. This year, the benchmark is the optimal operation of a quadruple tank system with two inputs and cross couplings, that represents a real implementation of the process first presented in [7].

The contest is divided in two phases

Phase 1: The controller has to demonstrate performance in simulation. The organization delivered a simulator in Matlab/Simulink for the four tank process, in which the participants should add a control block to operate the plant.

Phase 2: The controllers that passed the first phase are evaluated with a real plant.

The goal of this paper is to report the work done by the authors corresponding to the first phase of the contest.

2.1 Model Description

The dynamics of the system are well derived from basic principles leading to the following equations

$$\begin{aligned} A_1\frac{\mathrm{d}h_1}{\mathrm{d}t} &= -a_1\sqrt{2gh_1} + a_3\sqrt{2gh_3} + \gamma_a\frac{q_a}{3600} \\ A_2\frac{\mathrm{d}h_2}{\mathrm{d}t} &= -a_2\sqrt{2gh_2} + a_4\sqrt{2gh_4} + \gamma_b\frac{q_b}{3600} \\ A_3\frac{\mathrm{d}h_3}{\mathrm{d}t} &= -a_3\sqrt{2gh_3} + (1-\gamma_b)\frac{q_b}{3600} \\ A_4\frac{\mathrm{d}h_4}{\mathrm{d}t} &= -a_4\sqrt{2gh_4} + (1-\gamma_a)\frac{q_a}{3600}, \end{aligned} \tag{1}$$

where h_i, A_i and a_i are respectively the water level, the cross sectional area and the cross sectional equivalent outlet hole of the i-th tank. $\gamma_{a,b}$ are the deviation ratios for the water flow and $q_{a,b}$ are the flow inputs.

A representation of the plant is given in Fig. 1.

2.1.1 Model parameters and restrictions

The presented model is particularized for the parameters values in Table 1 and considering $A_i = 0.03\,\mathrm{m}^2 \quad \forall\, i = 1, ..., 4$.

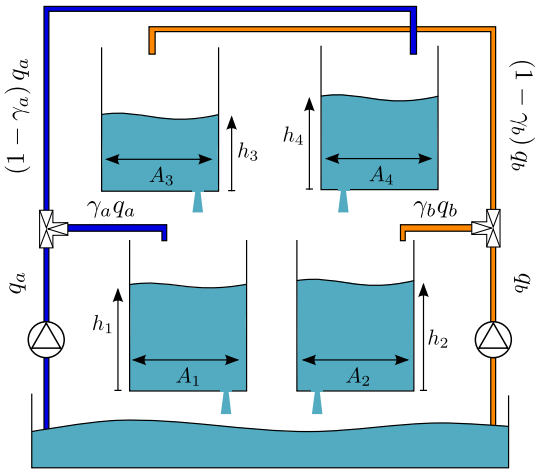


Figure 1: Quadruple tank process scheme.

Par.	Value	Par.	Value
a_1	$1.3104\,10^{-4}\,\mathrm{m}^2$	a_2	$1.5074\,10^{-4}\,\mathrm{m}^2$
a_3	$9.2673\,10^{-5}\,\mathrm{m}^2$	a_4	$8.8164\,10^{-5}\,\mathrm{m}^2$
γ_a	0.3	γ_b	0.4

Table 1: Model parameter values

In addition, operational constraints related to the states and the inputs exist

$$\begin{aligned} 0.2\,\mathrm{m} \le h_i \le 1.2\,\mathrm{m} \qquad & i = 1,2,3,4 \\ 0\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h} \le q_z \le 2.5\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h} \qquad & z = a, b. \end{aligned} \tag{2}$$

Since the model is representing a real process controlled by a computer, the control actions and sensor signals will be constant between sampling time instants. The minimum sampling time in which inputs and outputs may change is

$$T_s = 5\,\mathrm{s}.$$

2.2 Control goal and performance evaluation

The aim of the controller is to lead the plant to the optimal operation regime with respect to an economic criterion. The optimal operation is described as maximizing the water volume in the lower tanks while, at the same time, minimizing the energetic cost. It is expressed in form of the stage cost function

$$J_E = q_a^2 + cq_b^2 + \frac{pV_{min}}{A\,(h_1 + h_2)}, \tag{3}$$

being c and p external cost parameters that will fluctuate in time and V_{min} the minimum water volume for the lower tanks

$$V_{min} = 2Ah_{min} = 0.012\,\mathrm{m}^3.$$

The performance of the controlled system will be evaluated in function of a performance index (ID)

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

that accounts for the economic performance and penalizes the control when overpassing the level constraints

$$ID = \int_0^t \left[J_E\left(h(\tau), q(\tau), c(\tau), p(\tau)\right) - J^*\left(c(\tau), p(\tau)\right) + J_r(h(\tau))\right] \mathrm{d}\tau, \tag{4}$$

where J_E is the stage cost in (3), J^* is the minimum of J_E in steady state and

$$J_r = \sum_{i=1}^{4} \sigma(h_i), \tag{5}$$

being

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1 \cdot 10^3 \left|0.2 - x\right| & \text{if } x < 0.2 \\ 0 & \text{if } 0.2 \leq x \leq 1.2 \\ 1 \cdot 10^3 \left|x - 1.2\right| & \text{otherwise} \end{cases}.$$

3 Control

Due to the optimal and discrete nature of the stated problem, the EMPC technique emerges as an appropriate control strategy. This control technique solves an optimization problem in which a cost function is minimized over a prediction time horizon. The output of the optimization process includes a sequence of optimal control actions that, in absence of noise, applied over the input of the model used in prediction, would drive the outputs towards an optimal trajectory. In order to correct the possible drift between the model used in prediction and the real plant, and to reduce the effects of noise, the optimization process is repeated iteratively and only the first control action of the sequence is applied (receding horizon philosophy).

3.1 Problem formulation

In this paper, a dynamic system represented by the discrete-time model

$$x(k+1) = f\left(x(k), u(k)\right), \tag{6}$$

is considered, with state $x \in \mathbb{R}^{n_x}$, control input $u \in \mathbb{R}^{n_u}$, and $f : \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_u} \to \mathbb{R}^{n_x}$. For a given control sequence $u = \{u(0), u(1), ...u(L)\} \in \mathbb{R}^{L \times n_u}$, the solution of (6) with initial value $x(0) \in \mathbb{R}^{n_x}$ will be denoted as $x_u(k, x) \in \mathbb{R}^{L \times n_x}$. We denote as *admissible inputs* $u \in \mathbb{U} \subseteq \mathbb{R}^{n_u}$ those such that $x_u(k, x)$ stays in the admissible set $x \in \mathbb{X} \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$.

The optimization problem $\mathcal{P}_N$, with finite prediction horizon N, can be formulated as

$\mathcal{P}_N$:

$$\min_{u \in \mathbb{U}, x \in \mathbb{X}} \sum_{j=0}^{N-1} J_E(x(j), u(j), c, p) \tag{7a}$$

subject to

$$x(j+1) = f\left(x(j), u(j)\right) \tag{7b}$$
$$u(j) \in \mathbb{U} \quad \forall\, j = 0, 1, .., N-1 \tag{7c}$$
$$x(j) \in \mathbb{X} \quad \forall\, j = 0, 1, .., N-1 \tag{7d}$$
$$x(0) = x_0. \tag{7e}$$

The direct implementation of (7) does not ensure convergence, since there exist no terminal constraints, and the optimal cost function is not necessarily decreasing along the solution trajectory. In addition, since the cost function is not convex and the model is non-linear, the computational cost of the solution is high and turns very expensive for high N.

3.2 Problem modification

In order to solve the problem, we propose two modifications of the optimization problem, such that convergence with a minimum computational cost is guaranteed, and the computation time is kept below the sampling time prescribed for control.

3.2.1 Turnpike property and cost function goal modification

A system that exhibits turnpike property (for more details see [6]) will converge to steady state in the neighbourhood of the optimal operating point when an EMPC acts without any additional constraint in the terminal state. The turnpike property also implies that the optimal operating point is a stationary point and, moreover, the controlled system will converge to the optimal steady state for $N \to \infty$.

In this work, this property has not been proven mathematically, but it has been observed in successive simulations. Fig. 2 shows the water level in tank 3 when solving (7) using, as model, an Euler discrete version of (6), cost function (3) with $c = 0.5$ and $p = 10$, and a prediction horizon of $N = 70$. Similar behaviour is presented for different initial conditions, different values of c and p and moderate prediction horizons.

Since there exists a maximum time to find an appropriate solution at every iteration, N cannot be arbitrarily large. The convergence to the exact solution for a given prediction horizon is, therefore, not assured. Under the assumption that the system under consideration exhibits the turnpike

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

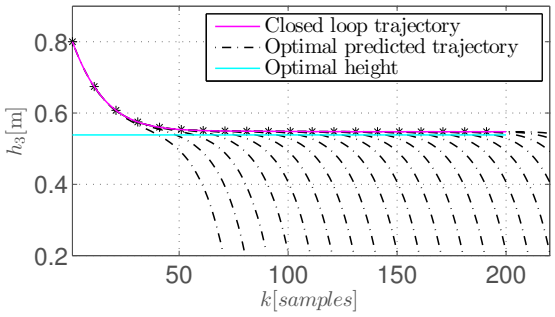


Figure 2: Turnpike behaviour for h_3.

property, it is expected to reach a steady state $\tilde{u}_s$, $\tilde{x}_s$ in the neighbourhood of the optimal steady state u_s, x_s.

With the idea to converge to the optimal point in acceptable time, it is proposed to modify the cost function by the addition of a quadratic term

$$J_T(x, u, x_S, u_S) = \|x - x_S\|^2 + \|u - u_S\|^2, \quad (8)$$

that accounts for the tracking performance and a switching mechanism that enables continuous alternation between economic and tracking objectives. The modified cost function is described as

$$\tilde{J}_1(x, u, c, p, x_S, u_S) = \rho(\vartheta) J_E(x, u, c, p) + (1 - \rho(\vartheta))\, J_T(x, u, x_S, u_S), \quad (9)$$

where $J_E(x, u, c, p)$ is the economic cost function in (3) and $\rho(\vartheta) : [0, \infty) \to [0, 1)$ is a logistic function with continuous derivative obtained as a modification of the Richards′ curve and defined as

$$\rho(\vartheta) = \frac{\frac{1}{\left(1+\chi e^{(-\beta[|\vartheta|-\epsilon])}\right)^{\frac{1}{\nu}}} - \rho^*}{1 - \rho^*}, \quad (10)$$

being

$$\rho^* = \frac{1}{(1 + \chi e^{\beta\epsilon})^{\frac{1}{\nu}}}.$$

In order to take advantage of the optimality that the EMPC brings in the transient response of the system, the independent parameter ϑ has been selected as an estimation of the slope of the cost function

$$\vartheta = J_E(k-1) - J_E(k-2). \quad (11)$$

Under this choice, the switching mechanism establishes a trade-off between both cost functions, giving preference to the economic objective when high deviations from the optimal point occur. On the other hand, the switching mechanism gives importance to the tracking objective when the economic solution is reaching the steady state.

The proposed modification of the cost function leads to a suboptimal operation. However, the weight of the tracking cost functional can be done sufficiently small by changing the parameters of the sigmoid function, allowing to

$$\underset{u\in\mathbb{U},\, x\in\mathbb{X}}{\operatorname{argmin}}\ \tilde{J}_1 \cong \underset{u\in\mathbb{U},\, x\in\mathbb{X}}{\operatorname{argmin}}\ J_E(x, u, c, p),$$

in the transient (high values of ϑ). Moreover, since once reached the optimal steady state (low values of ϑ)

$$\underset{u\in\mathbb{U},\, x\in\mathbb{X}}{\operatorname{argmin}}\ J_E(x, u, c, p) \cong \underset{u\in\mathbb{U},\, x\in\mathbb{X}}{\operatorname{argmin}}\ J_T(x, u, x_S, u_S),$$

the suboptimal operation will be mainly present in the transition from $\tilde{u}_s$, $\tilde{x}_s$ to u_s, x_s.

3.2.2 Constraint relaxation

Hard constraints to bound optimization variables hinder the search of the optimal point increasing the computational time.

In this work, the hard state constraints have been replaced by soft constraints, i.e. additional penalties in the cost function, by adding the same penalty cost that was defined in (5),

$$\tilde{J}_r(x) = J_r(x). \quad (12)$$

In this way, it is possible to overpass the bounds imposed in the states, and the controller may decide to do it if it brings to an improvement in the average cost of the predicted solution evaluated in the prediction horizon. This modification has no direct effect in the problem solution when the state remains in $\mathbb{X}$.

3.2.3 Relaxed Optimization problem

The modifications proposed in Section 3.2.1 and Section 3.2.2, besides the implicit state dependency elimination in the cost function by using the model equation (1), allows to reformulate the optimization problem as

$\tilde{\mathcal{P}}_N$:

$$\min_{u\in\mathbb{U}} \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{J}(u(j), c, p, x_S, u_S) \quad (13a)$$

subject to

$$u(j) \in \mathbb{U} \quad \forall\ j = 0, 1, .., N-1 \quad (13b)$$
$$x(0) = x_0, \quad (13c)$$

being

$$\tilde{J}(u, c, p, x_S, u_S) = \tilde{J}_1(u, c, p, x_S, u_S) + \tilde{J}_r(u),$$

where $\tilde{J}_1(u, c, p, x_S, u_S)$ and $\tilde{J}_r(u)$ represent respectively the cost in (9) and (12), with the state dependency removed.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

4 Tuning and Implementation

By using the control law proposed in Section 3, the control problem has been reduced to the choice of the prediction horizon, and the sigmoid function parameters.

The selection for the sigmoid curve parameters is shown in Table 2. The parameters have been tuned to activate the standard MPC control when the difference between the last two values of J_E are near to 0. The sigmoid function evaluated with the given parameters is shown in Fig. 3.

Par.	Value	Par.	Value
χ	0.5	ϵ	0.175
β	10	ν	0.5

Table 2: Control parameter values

The prediction horizon, N, has been fixed to 70 samples, as a trade-off between cost performance and calculation time. The optimization process has been implemented in MatLab/Simulink using a Level 2 S-function function that calls the `fmincon` solver. The default parameters of the solver have been maintained with the exception of the tolerances $\texttt{TolX} = 1 \cdot 10^{-6}$, and $\texttt{TolFun} = 1 \cdot 10^{-8}$. At every iteration the initial condition for the control sequence is constructed by a linear interpolation between the last applied control action and the optimal value in steady state.

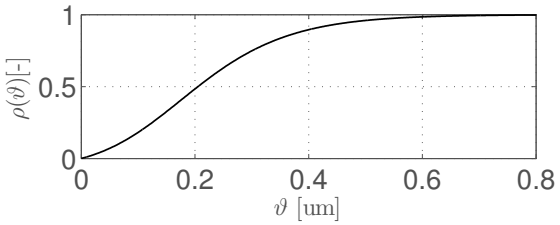


Figure 3: Sigmoid function, evaluated for the parameters in Table 2.

An observer has been implemented in simulator mode by using the unperturbed certain system of the four tanks in (1).

5 Performance analysis

All the results discussed from now on are related to the scenario defined as case 2 in the description of the first phase of the contest[2].

Fig. 4 shows the control actions calculated in the optimization process. As depicted in previous sections, the controller is designed to operate in a near-optimal way in transitions, i.e. when a change in the economic parameters exist. Once the system has reached the steady state, control inputs are computed to maintain this steady state.

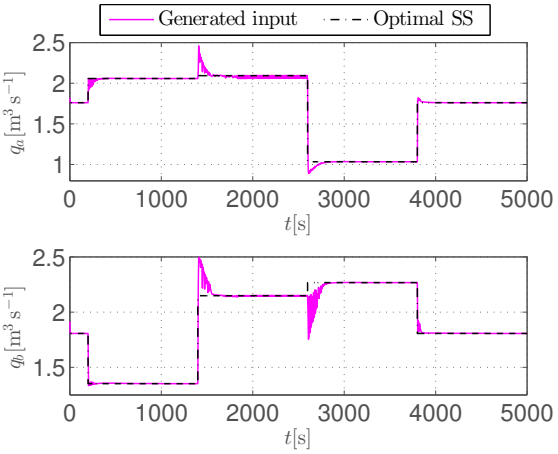


Figure 4: Flows.

Fig. 5 shows the water tank levels. It can be seen that the water levels never exceed the prescribed bounds, so the hard constraints are never violated.

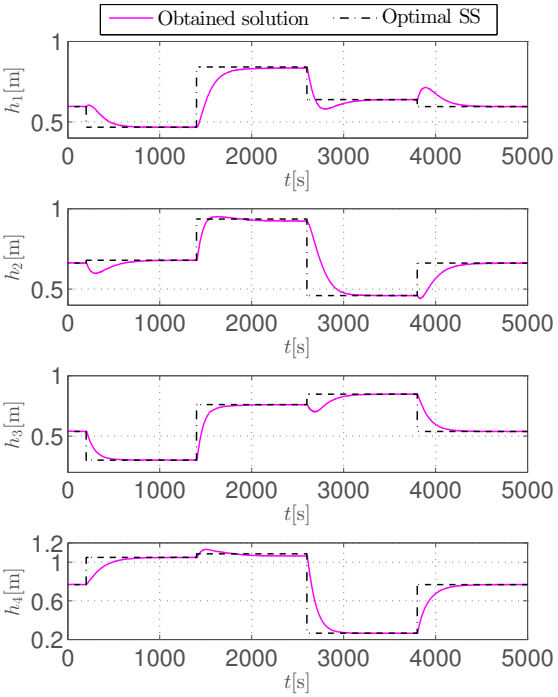


Figure 5: Water levels.

Fig. 6 shows the cost function (3) evaluated in the proposed scenario, the value of the ϑ parameter and the value for the sigmoidal function. It can be observed that the EMPC takes special relevance after a set-point change. The EMPC will

[2] http://www.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/CIC2014%20-Descripcion.pdf

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

act trying to minimize the area under the cost function J_E subject to the model equations. In the instants, in which the slope of J_E becomes sufficiently small (it implies ϑ small), the standard MPC starts acting to drive the system to the steady state optimal operation point.

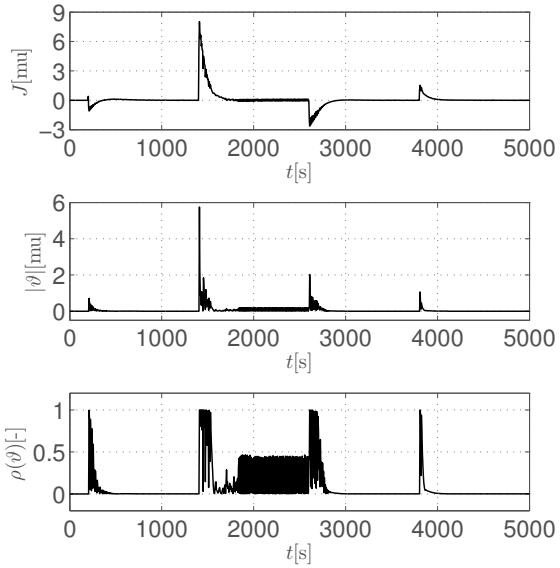


Figure 6: Cost evaluations. mu stands for monetary units.

The integration in time of the stage cost function shown in Fig. 6 according to (4) leads to an ID value of 424.7 mu. Results obtained on the same scenario by only using the standard MPC and the EMPC, while maintaining the prediction horizon and solver parameters, have lead to an ID values of 449.9 mu and 440.3 mu respectively.

6 Conclusions

A control strategy based on a combination of standard MPC and EMPC has been proposed to solve the control problem formulated in the context of the CIC 2014 contest.

We have verified by simulation that the system presents convergence to a steady state near the optimal steady state solution when only economic cost is considered.

To force the convergence, the cost function has been augmented by a tracking penalty cost and a smooth switching mechanism has been introduced to alternate between both objectives.

The formulated control solution has demonstrated the ability to converge to the optimal operation point after performing a suboptimal transition.

It has been proven that the suboptimality of the solution comes from time limitations that must be taken in account to fulfil implementability.

Results of the proposed control technique over the CIC 2014 contest scenario have been shown.

References

[1] Angeli, D., Amrit, R. and Rawlings, J.B. (2012). On average performance and stability of economic model predictive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57(7):pp. 1615–1626.

[2] Diehl, M., Amrit, R. and Rawlings, J.B. (2011). A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56(3):pp. 703–707.

[3] Ferramosca, A., Rawlings, J.B., Limon, D. and Camacho, E.F. (2010). Economic MPC for a changing economic criterion. *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 6131–6136.

[4] Goodwin, G.C., Seron, M.M. and De Dona, J.A. (2006). Constrained Control and Estimation: an optimization approach. Communications and Control Engineering. Springer, Berlin.

[5] Grüne, L. and Pannek, J. (2011). Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. Communications and Control Engineering. Springer, London, 1st ed.

[6] Grüne, L. (2013). Economic receding horizon control without terminal constraints. *Automatica*, vol. 49(3):pp. 725–734.

[7] Johansson, K.H. (2000). The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8(3):pp. 456–465.

[8] Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V. and Scokaert, P.O.M. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, vol. 36(6):pp. 789–814.

[9] Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, vol. 11(7):pp. 733 – 764.

[10] Rawlings, J.B., Angeli, D. and Bates, C.N. (2012). Fundamentals of economic model predictive control. In Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on, pp. 3851–3861.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

PROPUESTA DE ONTOLOGÍA PARA EL CONTROL DE ENTORNOS EXTERIORES

Miguel Juan-Monter, Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Lujan, Eduardo Munera, Raúl Simarro
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática (ETSINF), Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2). Universitat Politècnica de València (UP), Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain
{mijuamon, jojigar1}@inf.upv.es, {jopolu, emunera, rausifer}@ai2.upv.es

Resumen

El control distribuido inteligente de sistemas en entornos exteriores tiene ciertas dificultades dada la extensión y la agresión que el sistema tiene dadas las condiciones naturales, como lluvia o temperaturas variables, a los que estás expuestos los componentes. Para controlar los entornos distribuidos en exteriores se requiere que las características de los sistemas distribuidos (modularidad, escalabilidad, etc.) sean muy robustas. Para proporcionar robustez al sistema, las ontologías, y en general los lenguajes de modelado, permiten organizar los componentes proporcionando robustez al sistema, debido a que, independientemente del tipo de componente que se trate, la estructura es la misma, por lo que la modularidad está implícita y la escalabilidad sólo depende de los aspectos tecnológicos. En la actualidad han aparecido una gran cantidad de sistemas de microcontroladores de bajo coste y cierta potencia, por lo que su empleo en sistemas distribuidos está aumentando considerablemente. En este artículo es expone una ontología como método de organización de los componentes de un sistema distribuido de control inteligente de exteriores. La ontología parte del entorno a controlar en lugar de centrarse en los elementos de control y permite desarrollar una gran variedad de software aislado de los detalles de los elementos de control.

Palabras Clave: Control, Sistema Distribuido, Ontología, Arduino.

1 INTRODUCCIÓN

El control inteligente de sistemas distribuidos es uno de los campos más complejos del control especialmente por las dificultades de la sincronización entre los diferentes nodos [4]. La organización de los nodos permite establecer unas bases de funcionamiento eficiente de las comunicaciones. Con la aparición de los lenguajes de modelado, especialmente UML [3], los sistemas de control adoptan estos lenguajes para definir la arquitectura de los mismos [5].

En este artículo se presenta una ontología del control [10] de las características (iluminación, presencia y similares) para entornos abiertos. En estos entornos, el espacio es acotado al aire libre y todos los elementos del sistema distribuido no se encuentran en un entorno protegido, exceptuando el servidor o el sistema de comunicaciones troncal del sistema. La variedad de estos entornos es muy grande y va desde los jardines y espacios lúdicos (donde hay una alta cohabitación entre personas y naturaleza) hasta las amplias extensiones de naturaleza.

El artículo se organiza de la siguiente forma: el apartado 2 revisa los aspectos más destacables de los entornos abiertos y del sistema Arduentorno, dedicado al control de entornos abiertos con sistemas de bajo coste. El apartado 3 expone la propuesta de componentes del sistema y la ontología que permite organizarlos de forma eficiente. El apartado 4 muestra un ejemplo de uso del sistema en uno de los módulos del proyecto Arduentorno. Finalmente el apartado 5 expone las conclusiones y las líneas de trabajo a desarrollar.

2 ENTORNOS EXTERIORES

2.1 CARACTERÍSTICAS

Cuando un sistema distribuido interactúa con un espacio donde la extensión del terreno es notable, sugiere un número cuantioso de sensores, actuadores y nodos que los controlen. Además de una cierta complejidad en las comunicaciones. El sistema, distribuido al encontrarse en un entorno abierto, implica que el dominio en el que actúa es más agresivo que un entorno cerrado. El entorno tiene una gran cantidad de variables físicas y químicas, que pueden influir de una manera negativa. Además existe la posibilidad de que los elementos del sistema, reciban daño físico de animales e incluso personas.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

El conjunto de elementos de control que conforman un nodo, están situados en un área concreta del entorno abierto, dispone de una serie de variables difíciles de controlar. Un elemento de control, por ejemplo un sensor de temperatura, en un entorno cerrado donde la temperatura tiene una deriva temporal de largo plazo, es fácil de controlar, sin embargo, en un entorno abierto ese largo plazo puede convertirse en corto plazo, dando pasó a una variabilidad condicionada por los factores externos de esa área (rachas de viento o zonas que cubre la sombra rápidamente). Esta variabilidad implica ciertas dificultades en el control.

Algunas consideraciones a tener en cuenta, que caracterizan los entornos abiertos, y son relevantes en el diseño de un sistema de control exterior son las siguientes:

- Los elementos de control (sensores y actuadores), así como los nodos que los controlan, deben disponer de una red de comunicaciones inalámbrica para que todos los elementos estén interconectados.
- Cuando un sistema distribuido actúa en un entorno donde los datos que manejan los sensores, o actuadores, puedan estar comprometidos (especialmente por fallos provocados por las condiciones exteriores), es necesario replicar o emplear los diferentes elementos de control para poder validar la información que transmiten o realizar una acción de control de mejor calidad.

La organización de los elementos está implícita en el uso de las comunicaciones ya que debe haber conexiones que ya definen una relación. La necesidad de disponer del mayor número de elementos para determinar la acción de control hace que sea de gran interés disponer de los datos de todos los elementos posibles y, por tanto, conocer cómo obtener esos datos, por ejemplo que un controlador pueda pedir el valor de un sensor que no está conectado directamente. Las dos características (organización y ubicación) de elementos del sistema se pueden obtener por medio de una ontología que permite a todos los elementos un conocimiento del sistema, tanto de las características de los otros elementos que lo forman como de las funcionalidades que estos elementos ofrecen.

El objetivo principal de esta ontología es fomentar la escalabilidad y la mantenibilidad del sistema distribuido. En este sistema distribuido, cada nodo transmite su información a otro nodo, que la puede emplear, o a un servidor que la centraliza. De esta manera se permite desplegar una amplia red de nodos, que cubre grandes extensiones de terreno y cumple los requisitos del sistema.

2.2 PROYECTO ARDUENTORNO

La ontología presentada en este artículo, se aplica dentro de un proyecto denominado ArduEntorno (dado que el control básico se realiza por medio de Arduinos), compuesto por varios módulos, cada uno de ellos dedicado a una funcionalidad específica. Estas funcionalidades se enmarcan dentro de las áreas clásicas de la domótica [9], pero aplicadas a entornos exteriores (figura 1). Actualmente estos módulos se encuentran en fase de desarrollo y experimental.

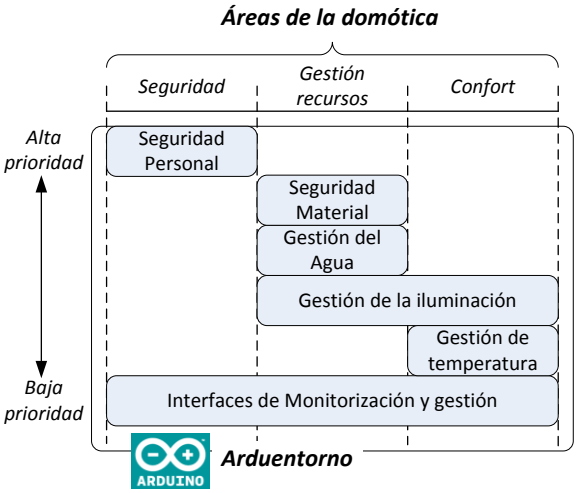


Figura 1: Módulos en desarrollo del sistema Arduentorno y su ubicación en las áreas de la domótica clásica.

Además de los módulos presentados en la figura 1, también se están desarrollando los sistemas de monitorización y gestión remota, tanto vía Web como por medio de dispositivos móviles. Este aspecto implica que la información que el sistema suministre (por lo general la que procede de los sensores) y la que sea necesaria suministrarle al sistema (habitualmente la de los actuadores o configuración) deberá transmitirse a los controladores de cada módulo.

Como todo sistema modular debe estar preparado para crecer por medio de la adición de nuevos módulos, por lo que los aspectos relacionados con la escalabilidad se deberán tener en cuenta. Esto último implica que la organización de los elementos del sistema debe ser común a todos los módulos.

Finalmente, se debe tener en cuenta el aspecto de la optimización de recursos empleados, en cierto modo, relacionado con la gestión energética. Esta optimización se realiza por medio del uso de un mismo sensor en módulos diferentes. Por ejemplo, un sensor de presencia (PIR), que cubre una zona

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

concreta del entorno, puede usarse por parte del módulo de seguridad para detectar intrusiones, y por parte del módulo de iluminación para encender o apagar las luces de un camino en función de si hay presencia.

Por todo lo anterior, se hace necesaria una organización distribuida y muy bien organizada que permita cubrir el control modular y además sea escalable y homogénea a todos los elementos del sistema. Para ello se ha desarrollado un ontología que organice y describa unívocamente los elementos y las relaciones entre ellos. Las ontologías son una herramienta importante y ampliamente utilizadas en todas las áreas de la tecnología [2] y también son aplicables al control [8]. En el siguiente apartado se presenta la ontología desarrollada que cubre las necesidades organizativas del proyecto Arduentorno.

3 PROPUESTA DE ONTOLOGÍA PARA EL CONTROL DE ENTORNOS ABIERTOS

3.1 ORGANIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

Para desarrollar la ontología que describa y organice los elementos e interacciones entre ellos, es necesario reconocer los elementos fundamentales con los que se va a trabajar (figura 2).

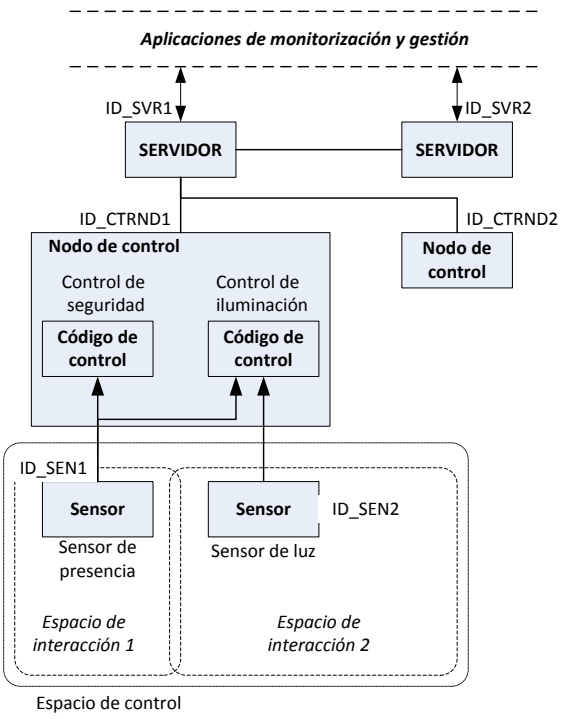


Figura 2: Principales elementos de control del sistema Arduentorno.

En este caso, se partió de los sensores y actuadores, a los que, en el sistema Ardu-Entorno y consiguientemente en la ontología, se les denomina: *elementos de control*. Cada elemento de control tiene un espacio físico donde interviene. A ese espacio se le denomina *espacio de interacción*. Por ejemplo, en el caso de un sensor PIR, el espacio de interacción es la zona, o volumen, donde puede detectar presencia; en el caso de un actuador, por ejemplo una luminaria, el espacio de interacción es el volumen que dicha luminaria es capaz de iluminar.

Para manejar los elementos de control se emplean los llamados *nodos de control*. El objetivo principal de los nodos de control, es controlar la zona de interacción de los elementos que están conectados al nodo. Dependiendo del tipo de sensor que conforme el nodo de control, se obtendrá un tipo de información diferente (iluminación, detección de presencia y similares). De manera análoga en cuanto a la interconexión con el nodo de control, existen una serie de actuadores encargados de actuar en un área concreta. Dependiendo del tipo de actuador interconectado, se pueden controlar una serie de dispositivos como puede ser la iluminaria de una zona o incluso la acústica instalada en una terraza.

Cada elemento de control puede ser visto por nodos de control a los que no esté conectado. En este caso, se trata de un elemento virtual, ya que en algunos casos, un nodo de control puede solicitar, la información de un sensor interconectado a otro nodo de control. La unión de los diferentes espacios de interacción de los diferentes elementos de control, incluidos los virtuales, se conoce como *espacio de control*. Los nodos de control pueden ejercer la labora de comunicación, encargándose de interconectarse con otros nodos y así garantizar la conexión de todos los elementos de control,

Finalmente, los servidores son los componentes del sistema responsables de gestionar la información transmitida por los diferentes nodos de comunicaciones.

3.2 IMPLEMENTACION DE LA ONTOLOGIA

La figura 3 muestra la ontología desarrollada para el control de espacios abiertos descrito en el punto anterior. El espacio físico a controlar se divide en distintas áreas de control. Estas áreas se organizan por medio de la entidad *Area*, que describe un espacio limitado por el usuario, como por ejemplo, la zona de entrada, o la zona de seguridad. El sistema puede tener tantas entidades *Area* como el usuario decida.

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

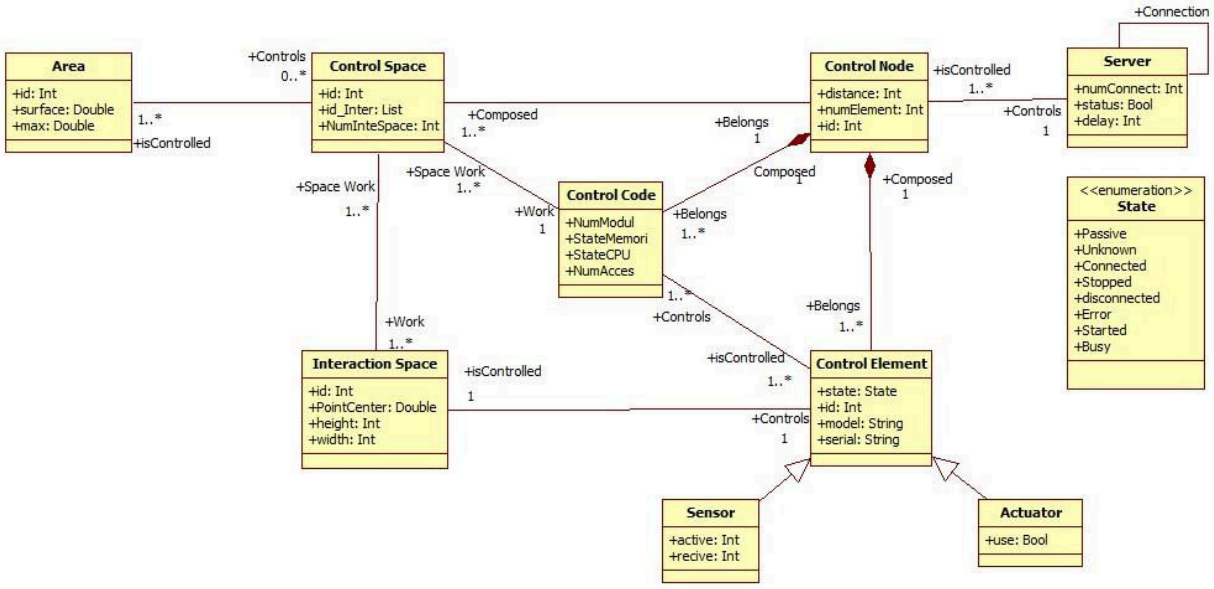


Figura 3: Ontología de control de espacios abiertos.

Un *Area* está puede tener, o no, elementos de control (*ControlElement* en la ontología), por ejemplo, sensores que midan temperatura o humidificadores que varíen la humedad relativa. Sin embargo, y por las necesidades presentadas en los apartados anteriores, estos elementos de control no se asocian directamente al *Area*. Los elementos de control disponen de un *InteractionSpace* que es la zona donde interactúan, por ejemplo en el caso de un PIR el *InteractionSpace* es la zona de detección de presencia y en el caso de una luminaria, el *InteractionSpace* es la zona que ilumina (a partir de un determinado umbral). Un *ControlElement* es empleado por uno o más códigos de control (*ControlCode*) y esto es la clave de la ontología. El *ControlCode* se procesa en un *ControlNode* que, a su vez, dispone de muchos *ControlElement*. Esta estructura no es la clásica estructura jerárquica, sino que forma un grafo, donde el *ControlNode* puede disponer de sensores o actuadores (*ControlElement*) que estén directamente conectados o que estén conectados en otro *ControlNode*. De esta forma, por ejemplo, un sensor PIR puede ser compartido por el módulo de seguridad (por ejemplo para hacer sonar una sirena) y por el módulo de iluminación (para encender o apagar la luz). Cada *ControlElement* tiene un *InteractionSpace*, como un *ControlNode* tiene varios *ControlElement* que intervienen en el control, la unión de los *InteractionSpace* forma un *ControlSpace*, que es la zona que se asocia a las *Area* definidas por el usuario.

En pocas palabras, en el sistema no se controlan áreas definidas por el usuario, aunque éste tenga la impresión de que los sensores y actuadores de un área están empleándose en dicha área. De esta forma, se aísla la estructura que el usuario ha decidido organizar el espacio exterior con los nodos de control.

4 EJEMPLO DE USO

Para la validación del uso de la ontología, se ha desarrollado un prototipo de sistema básico que controla la iluminación de un entorno. Para ello se ha empleado un microcontrolador empotrado Arduino UNO Rev.3 [1] junto a diversos sensores de luz, de presencia y de distancia (por ultrasonidos). El objetivo del control es determinar el nivel de luz que se debe regular en diferentes farolas en un camino (figura 4).

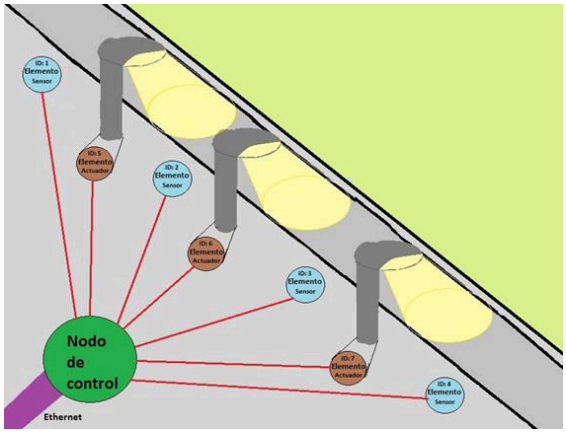


Figura 4: Ejemplo del sistema controlado por el prototipo que emplea la ontología presentada.

Sin embargo, el sistema de la figura 4, se puede enriquecer con la información proporcionada por los sensores del módulo de seguridad

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

A partir de estos criterios y en función del escenario planteado en la figura 4, se pasa a montar el circuito que implementa las funciones anteriores (figura 5). Los criterios que el código de control va a emplear son diferentes según las necesidades del usuario y se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Acciones de control y prioridades del sistema de iluminación.

Prioridad	Modo y descripción
Alta	Manual. El usuario puede accionar las luces independientemente de los valores de los sensores.
Media	Predictivo. La luz se enciende en el caso de que la luminosidad exterior no supere un umbral definido y se detecte presencia.
Baja	Ambiental. La luz se enciende en el caso de que la luminosidad exterior no supere un umbral definido sin tener en cuenta la presencia.

El código que el Arduino ejecuta es el encargado de recoger el modo de funcionamiento del camino y actuar en consecuencia. Para configurar los modos y los parámetros de cada modo (umbral de luz o umbral de detección) se emplea una aplicación desarrollada en JAVA, instalada en el servidor y se comunica con el nodo de control por medio de una conexión TCP sobre Ethernet (figura 6).

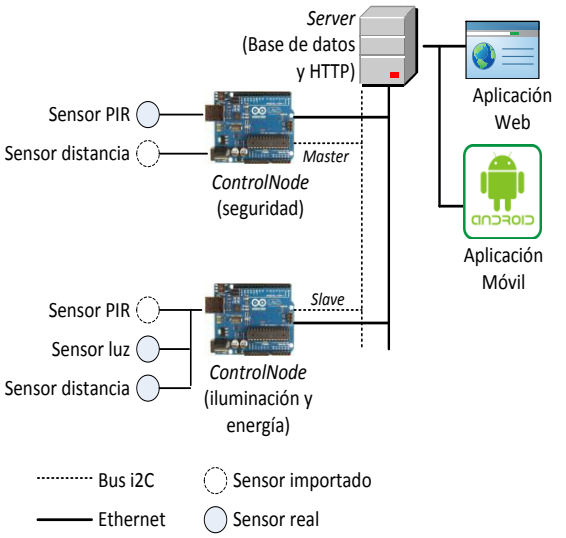


Figura 5: Esquema del sistema implementado. Los actuadores se han omitido para simplificar la visualización.

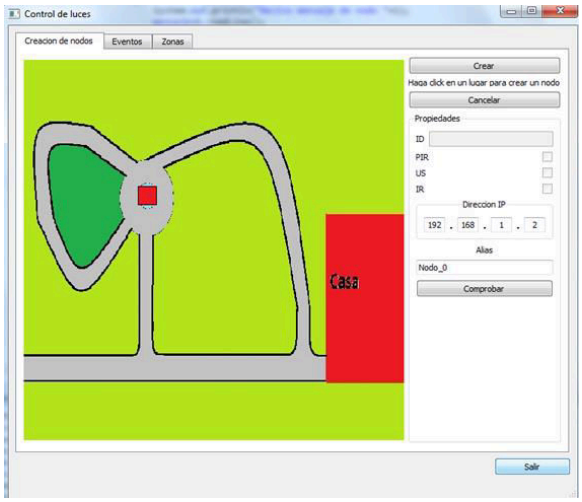


Figura 6: Captura de pantalla de la aplicación JAVA de control del prototipo que emplea la ontología presentada.

Además también se ha desarrollado una aplicación móvil con la misma funcionalidad. No es objetivo de este artículo mostrar los detalles de las comunicaciones ni del sistema gestor de base de datos que se emplea. Sin embargo sí que conviene puntualizar que las comunicaciones entre los nodos de control (Arduinos) se realizan tanto por conexión serie i2C [7] con el nodo de control que está conectado a Ethernet como nodo maestro, mientras que la conexión entre los Arduinos y los servidores se realiza por e como por conexión Ethernet [6]. Sin embargo, cabe destacar que el hecho de emplear la ontología uniformiza tanto las comunicaciones como la gestión de la base de datos. Lo que permite visualizar el sistema sin entrar en los detalles de los sensores reales o importados. Es decir, a efectos del usuario, en el sistema de la figura 6, se visualiza el control de seguridad con sensores presencia y sensores de distancia y el control de la iluminación con sensores de presencia, sensores de distancia y sensores de luz.

5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una ontología empleada para poder controlar espacios abiertos exteriores, aunque no es excluyente a espacios interiores. La ontología permite incrementar los algoritmos de un nodo de control reutilizando los elementos que el sistema dispone. Un servidor es el responsable de guardar las configuraciones del sistema y proporcionar las conexiones entre los elementos de control que permiten reutilizarlos en otros nodos de control.

Actualmente está implementado el sistema de control de iluminación compartiendo sensores con el sistema

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

de seguridad, de forma que lo sensores necesarios para el sistema de seguridad están directamente conectados con los nodos de control de seguridad y se comparten vía serie con el nodo de control de iluminación, dado que la seguridad es más prioritaria que la iluminación.

Como línea futura se plantea el estudio y la experimentación de diversos escenarios mediante la medición parámetros que permitan demostrar la utilidad del uso de una ontología. En concreto la inclusión del sistema de control energético y la medición de un sistema con duplicidad en sensores y sin sensores duplicados.

Finalmente, es de gran interés para los autores, estudiar y experimentar la programación de patrones de control, de tal forma que sea posible configurar el código del Arduino empleando una aplicación en la que se definan los umbrales de los sensores y las acciones a tomar en cuenta a partir de esos umbrales (a semejanza de las funcionalidades mostradas en la tabla 1).

Agradecimientos

Este trabajo se está realizando bajo las ayudas del proyecto coordinado COBAMI “Control Basado en Misiones” del Ministerio de Educacion y Ciencia del Gobierno Español. CICYT: MICINN: DPI2011-28507-C02-01/02 y el proyecto “Gestión Eficiente De Las Comunicaciones En Sistemas De Control Distribuido En Tiempo Real” financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la UPV bajo el programa PAID-06-12 ref. SP20120834.

Referencias

[1] Banzi, Massimo. Getting Started with arduino. " O'Reilly Media, Inc.", 2009.

[2] Bernaras, A; Laresgoiti, I; Bartolome, N.; Corera, J., "An ontology for fault diagnosis in electrical networks," Intelligent Systems Applications to Power Systems, 1996. Proceedings, ISAP '96., International Conference on , vol., no., pp.199,203, 28 Jan-2 Feb 1996. doi: 10.1109/ISAP.1996.501068

[3] Booch, G., Jacobson I., Rumbaugh, J. The UML Specification Document. Rational Software Corp., 1997

[4] Dorf, R.C., Bishop, R.H. Modern Control Systems, 11th Edition, Prentice Hall. 2008

[5] Marcos, M., Estévez, E., Gangoiti, U., Sarachaga, I., & Barandiarán, J. (2004). UML modelling of industrial distributed control systems. In Proceedings Sixth Portuguese Conference on Automatic Control (pp. 7-9).

[6] Metcalfe, R. M., Boggs, D. R. (1976). Ethernet: distributed packet switching for local computer networks. Communications of the ACM, 19(7), 395-404.

[7] Philips. The I2C-bus specification. Philips Semiconductors, 2000, vol. 9397, no 750, p. 00954.

[8] Poza, J. L.; Posadas, J. L. & Simó, J. E. (2009), Adding an Ontology to a Standardized QoS-Based MAS Middleware., in Sigeru Omatu; Miguel Rocha; José Bravo; Florentino Fernández Riverola; Emilio Corchado; Andrés Bustillo & Juan M. Corchado, ed., 'IWANN (2)' , Springer, , pp. 83-90 .

[9] Sánchez P, Sánchez M, Jiménez F, Rosique B, Álvarez A, Iborra. A framework for developing home automation systems: From requirements to code. The Journal of systems and software 2011;84(6):1008-1021.

[10] Sowa, J. F. (1995). "Top-level ontological categories". International Journal of Human-Computer Studies 43 (5-6 (November/December)): 669–85

ISBN-13: 978-84-697-0589-6 © 2014 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)