

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL CONTROLADO POR COMPUTADOR CON RECONOCIMIENTO DE LA UBICACIÓN DE OBSTÁCULOS EN EL ENTORNO Y ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE LA TRAYECTORIA.

Julio César Castellanos Eljach[†], Carlos Mario Araujo Berrocal^{*}

**Universidad Pontificia Bolivariana, Km. 8 vía a Cereté, Montería, Colombia*

Recibido 18 Septiembre 2012; aceptado 12 Diciembre 2012

Disponible en línea: 21 Diciembre de 2012

Resumen: En el presente artículo se describe el diseño e implementación de un sistema robot móvil controlado desde un computador que se encargará de realizar un reconocimiento del medio en el cual se desplaza y a través de algoritmos especializados, determinar las trayectorias que tiendan a ser óptimas. Para esta aplicación se construye un móvil con movimientos en cuatro direcciones (adelante, atrás, derecha, izquierda) y empleando un sistema de procesamiento de imágenes se obtiene los obstáculos y se controla la posición del móvil a través de un control realimentado. Se emplean transmisores inalámbricos para el intercambio de información con el computador; además se realiza una plataforma la cual servirá como medio a ser reconocido. Finalmente se realizaron en MATLAB® los algoritmos de procesamiento de imágenes y planeación de rutas y trayectorias.

Palabras clave: Planeación de Rutas, Planeación de Trayectorias, Procesamiento de Imágenes, Sistema Robot, Comunicaciones Inalámbricas Xbee.

Abstract: — In this paper the design and the implementation of a controlled mobile robot system is explained. The system will be controlled by a computer which will recognize the environment in which the mobile will be moving, using specific algorithms for path and trajectory planning. For this application, a mobile with two degrees of freedom and a PWM generator system with a PIC microcontroller is built. The positions of the mobile and the obstacles are obtained using an image processing system. The information is shared between the control system in the mobile and the PC using a wireless transceiver device of the Xbee family. Furthermore a platform is built to be recognized as the scenery. Finally the algorithms for image processing and path and trajectory planning are implemented in MATLAB®.

Keywords: Path planning, trajectory planning, image processing, robot system, Xbee wireless communications.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+574) 7860146.

E-mail: juliocastellanos1@hotmail.com (Julio Castellanos)

1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la robótica tiene su importancia la elaboración de dispositivos capaces de trabajar en forma autónoma en ambientes hostiles no aptos para la intervención directa del hombre, como por ejemplo exploraciones espaciales, exploraciones submarinas, rescate en ambientes de desastre, manejo de inventarios, entre otras; también en el uso de tecnologías aplicadas a la agroindustria, y otro tipo de tareas como guía para personas discapacitadas.

Estas tecnologías están basadas en la realización de dispositivos móviles capaces de realizar un reconocimiento del área donde están laborando, de tal manera que pueden identificar la posición e incluso posibles movimientos de los obstáculos. Además es necesario realizar operaciones de cálculo, para encontrar las trayectorias más adecuadas que puede seguir el dispositivo para llegar a su destino.

El problema de la realización de las tareas anteriores consiste en la búsqueda y desarrollo de metodologías o técnicas que las posibiliten, dentro de las cuales existen una gran variedad de técnicas como el uso de redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos, entre otras, en donde no se puede determinar por simple inspección si una es mejor que la otra, sino que se hace necesario además de la adquisición de conocimientos en cuanto a la teoría, variantes, usos, ventajas, desventajas y posibilidad de implementación; realizar un análisis riguroso de las características del sistema a controlar. De igual manera la implementación física del dispositivo supone cierto número de condiciones a tener en cuenta, como características de los motores, configuración de los sensores, el ambiente en el cual se desplaza, la transmisión de señales, que aumentan la dificultad del diseño e implementación de estas tecnologías.

2. REFERENTE TEORICO

2.1. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes se refiere a todas aquellas tareas realizadas con el fin de extraer patrones, identificar características, reconstruir, modificar, mezclar o comparar imágenes digitales. Dentro de estas tareas se distinguen el filtrado, la Transformada Rápida de

Fourier (FFT), descomposición en colores, suavizado, detección de bordes, umbralización, binarización, entre otras ([Gonzalez y Woods, 1996](#)).

El concepto de umbralización se refiere a realizar una reducción de la resolución de los colores de una imagen para facilitar el procesamiento ([Gonzalez et al., 2004](#)). De esta manera si en la imagen predominan algunos colores es posible descartar los otros para aumentar los contrastes y se más sencilla la detección de regiones, que se describirá más adelante. La umbralización normalmente se realiza para que la imagen contenga dos colores blanco y negro, y consiste en escoger un nivel de 0 a 255 a partir del cual los mayores a este serán 255 (blanco) y los menores serán 0 (negro), a esta imagen en dos colores se le conoce como imagen binaria ([Gonzalez et al., 2004](#)).

Una región de interés (ROI¹) se define como un grupo de píxeles que están en contacto y tienen el mismo valor específico o el mismo rango de valores específicos. Se considera que los píxeles están en contacto si son horizontal o verticalmente adyacentes². Ver [figura 1](#) donde se observa los píxeles que están en contacto con el píxel en la posición (i,j) .

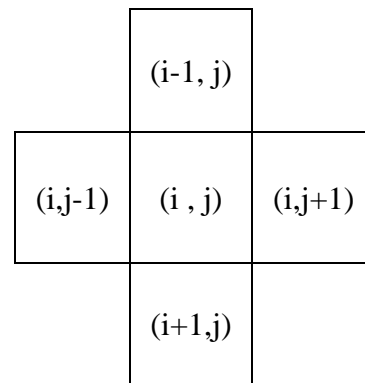


Fig. 1. Píxeles en contacto

La escogencia de las regiones de interés se puede realizar de acuerdo al criterio de algún color específico.

¹ROI: del Inglés: *Region Of Interest*

² Matlab® Function Reference. “Image Acquisition Toolbox”

Matlab® Function Reference. “Graphical User Interfaces”

Matlab® Function Reference. “Image Processing Toolbox”

El área de una región de interés se define como el número de píxeles contenidos en dicha región ([Barrientos et al., 1998](#)).

Uno de los parámetros esenciales en el seguimiento de objetos es conocer la posición del centro de las regiones de interés. Una vez clasificados los píxeles pertenecientes a una región de interés, el centroide de esta se calcula utilizando la siguiente fórmula ([Rentería y Rivas, 2000](#)):

$$Y_{centroide} = \frac{\sum Y_{coordenadas}}{No\ de\ pixeles}$$

$$X_{centroide} = \frac{\sum X_{coordenadas}}{No\ de\ pixeles}$$

2.2. Planeación de trayectorias

Se define W como un espacio Euclidiano, llamado espacio de trabajo, representado como R^n , con $N = 2$ en este caso.

Sea A un objeto rígido simple (el robot móvil) con geometría aproximadamente conocida, que se mueve en el espacio W sin restricciones cinemáticas en el movimiento de A (es decir A es un objeto de libre movimiento).

Sean B_1, \dots, B_q objetos rígidos distribuidos en W que actúan como obstáculos, y que tienen geometrías aproximadamente conocidas. Ver [figura 2](#).

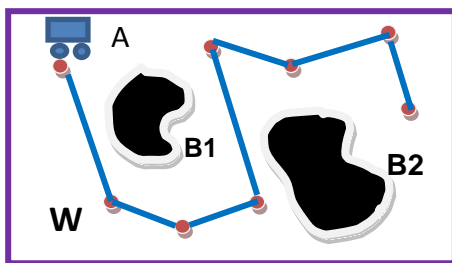


Fig. 2. Problema básico de planeación de trayectorias

El problema de planeación de trayectorias consiste en que dada una posición inicial y orientación de A en W, generar un camino especificando una secuencia continua de posiciones de A evitando el contacto con los B_i ,

hasta llegar a una posición final o meta con una orientación deseada.

Para la solución del problema de planeación de trayectorias del robot A al evitar los obstáculos B_i , en el espacio de trabajo W existen dos enfoques, el de la planeación local y el de la planeación global.

El problema básico de planeación global de trayectorias es generar una trayectoria, especificando una secuencia continua de posiciones y orientaciones de A evitando el contacto con los B_i , comenzando en una posición y orientación inicial de A y terminando en la posición de la meta, reportando falla si dicha trayectoria no existe.

El problema de la planeación local es diferente ya que no se conoce de antemano la ubicación de los obstáculos, por lo tanto estos van a ser encontrados en tiempo real de acuerdo a la información que proviene de los sensores ([Ollero, 2001](#); [Dudek, 2000](#); [Martin del Brío et al., 2002](#); [Cerón, 2005](#); [Fitch, 2001](#)).

3. METODOLOGIA

3.1. Búsqueda de rutas probables

Uno de los métodos más utilizados en la planeación de rutas es la búsqueda probabilística, este método se compone fundamentalmente de cinco procedimientos ([Song, 2001](#)).

Creación de un escenario. Se implementa un escenario real o virtual en el cual se ejecutarán los desplazamientos. Este escenario puede ser bidimensional o tridimensional ver [figura 3](#).



Fig. 3. Escenario

Ubicación de obstáculos. Se identifican las zonas del escenario a través de las cuales no pueden

establecerse rutas, en la [figura 4](#), se muestran éstas áreas.

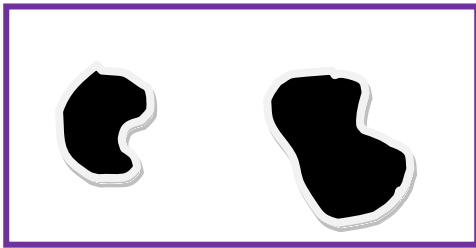


Fig. 4. Identificación de obstáculos

Ubicación de puntos de referencia. Se ubican aleatoriamente puntos de referencia en el espacio “libre” del escenario. La probabilidad de los puntos va a depender de la aplicación y del tipo de escenario. Ver [figura 5](#) para observar este procedimiento.

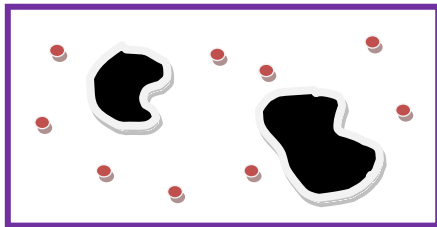


Fig. 5. Puntos de Referencia

Creación de rutas. Se define entre cuáles de los puntos establecidos se pueden realizar conexiones utilizando principalmente líneas rectas, se busca que las líneas no atraviesen zonas marcadas como obstáculos. Ver [figura 6](#) donde se muestran las posibles rutas de este caso.

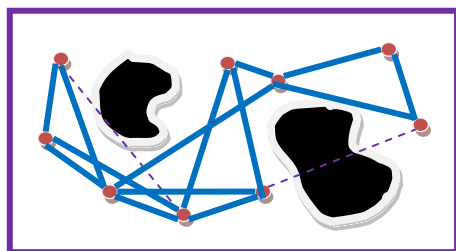


Fig. 6. Creación de rutas

Búsqueda de rutas válidas. Finalmente se establecen los puntos de partida y llegada en una prueba. De manera aleatoria a manera de saltos el sistema comienza a buscar las rutas que conectan

estos dos puntos, que vendrían a ser soluciones del problema. Ver [figura 7](#) en la cual se muestra una solución para llegar de un punto A a un punto B del escenario.

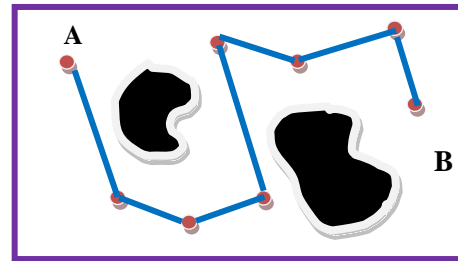


Fig. 7. Solución

Para la planeación de rutas se elaboró con el software Matlab® un algoritmo de acuerdo con el procedimiento de búsqueda de rutas probabilísticamente descrito anteriormente. Virtualmente el escenario es una matriz binaria, en el cual los “1” simbolizan zonas libres y los “0” zonas de obstáculos. A través de la función rand se crea una matriz aleatoria binaria, en este caso los “1” simbolizan la posición de los puntos de referencia. Se crean líneas discretas entre dichos puntos y se comprueba que los puntos pertenecientes a las líneas no se traslapan con los ceros de la matriz del escenario. Se realizan saltos aleatorios, almacenando en vectores la posición de los puntos posibles en una trayectoria. Se buscan de un número determinado de soluciones y de acuerdo con el criterio de la distancia euclidiana se establece la más corta.

Para controlar los motores del móvil se utiliza el módulo Pulse-Width Modulation (PWM) Capture Compare PWM (CCP) del PIC16F877A, y un circuito con puente H para la inversión de giro de los motores.

Para el control de velocidad de los motores se tiene en cuenta el criterio de decisión dictado por el controlador en el computador, de tal manera que debe existir un medio de comunicación entre el microcontrolador PIC y el computador, esto se hace utilizando dos módulos transeptores XBee con comunicación serial RS232.

El móvil escogido es un móvil tipo oruga de tal manera que se faciliten los giros y los movimientos sean más precisos. Además es necesaria una plataforma en donde se ubiquen los obstáculos y se realicen los recorridos.

El reconocimiento del escenario se realiza a través de un sistema de visión artificial. La adquisición de las imágenes se hace a través de una cámara web genérica, y el procesamiento utilizando el toolbox Image Processing and Acquisition de MATLAB®, la tarea consiste en reconocer las zonas libres y zonas con obstáculos del escenario, así se establece la matriz binaria. Además el sistema de visión artificial permite obtener la posición del móvil.

Adquisición de Imágenes. Utilizando una cámara y con MATLAB® es posible digitalizar la imagen del móvil y el escenario donde se encuentra. Para esto se crea un objeto de video con la función video input y una variable en donde queda almacenada la Matriz Red Green Blue (RGB).

Extracción de características: Para conocer la posición y el ángulo del móvil, es necesario establecer una serie de patrones en la imagen que puedan ser reconocidos fácilmente para lo cual se disponen ciertos indicadores en la parte superior del móvil, ver [figura 8](#).

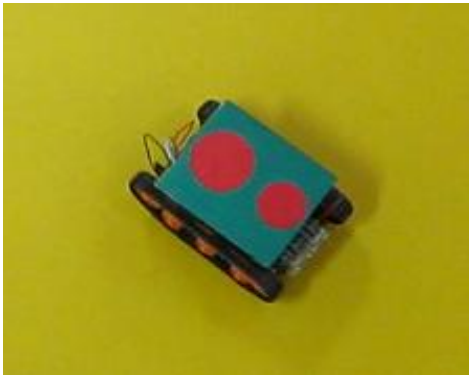


Fig. 8. Indicadores del móvil

Para el móvil se debe reconocer el color rojo de los puntos para obtener la posición dentro del escenario y el tamaño para diferenciar el punto de adelante y el de atrás, ver [figura 8](#).

Para el reconocimiento del color rojo se crea una matriz binaria en la cual son “1” aquellos puntos de la imagen que poseen un nivel de rojo por encima del verde y el azul. Ver [figura 9](#) con la imagen binaria.

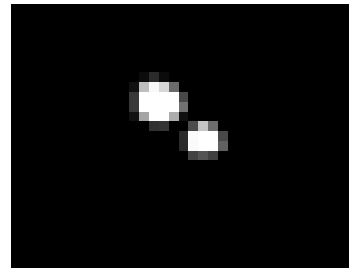


Fig. 9. Imagen Binarizada

Claramente se observa que son distinguibles dos regiones de interés de color rojo. Sin embargo, son de diferente tamaño, para lo cual se usa las funciones label y regionprops, para calcular el área de cada región y su centroide.

Haciendo una comparación entre áreas y centroides se calcula la posición de las partes delantera y trasera del móvil, utilizando la función tangente inversa, se calcula el ángulo.

$$\text{ang_movil} = \text{atan}((y_ad - y_atr)/(x_ad - x_atr))$$

Sistema de control de trayectoria. Una vez escogida la ruta a seguir, es necesario guiar al móvil por dicha ruta, esta guía se realiza de dos maneras, a través de un control on-off con algunas variaciones se comprueba que el ángulo del móvil coincide con el ángulo necesario para seguir en línea recta y encontrarse con los puntos de referencia pertenecientes a la ruta, se utiliza un criterio de cercanía de acuerdo a la distancia euclidiana entre la posición del móvil y el punto de referencia para establecer si ya ha sido alcanzado.

Comparador. La posición deseada es establecida por la ruta que se desea seguir, por otro lado el ángulo deseado se estima dinámicamente teniendo en cuenta el ángulo entre la posición delantera del móvil y la posición objetivo. El papel del comparador es establecer el error entre la posición deseada y la posición del móvil, medido como la distancia euclidiana entre los dos puntos, además el error entre el ángulo deseado y el ángulo del móvil.

$$\text{error_pos} = \text{sqrt}((x\text{des}-x\text{real})^2 + (y\text{des}-y\text{real})^2)$$

$$\text{error_ang} = \text{ang_des} - \text{ang_movil}$$

Controlador. Realiza dos procesos, el primero

verifica si la posición deseada y la posición del móvil son cercanas, estos son valores establecidos en pruebas, de ser así el movimiento termina, sino se sigue con el control de ángulo, que es el segundo proceso. En esta parte si la diferencia de ángulo es positiva se hace girar el móvil hacia la derecha, o hacia la izquierda en el caso contrario. La velocidad de giro se determina mediante un control Proporcional Integral Derivativo (PID) quien variará este parámetro para evitar oscilaciones en el móvil, y asegurar la corrección del error. De acuerdo a un criterio práctico cuando el error angular se encuentre en determinado rango, se dará la orden para que el móvil vaya hacia adelante. El proceso se repite hasta encontrar la posición deseada.

Interfaz gráfica. El sistema total es administrado en una interfaz gráfica de usuario (GUI) en la cual es posible establecer criterios como el punto de llegada del móvil (el punto de partida se establece con la visión artificial desde la posición inicial del móvil), la probabilidad de puntos de referencia. La interfaz permite el seguimiento paso a paso del proceso y la visualización del ángulo de referencia y el ángulo real.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestra el móvil y la plataforma de color amarillo sobre la cual se desplaza el móvil, en donde los obstáculos presentan un color negro. El móvil presenta dos puntos de color rojo de diferentes tamaños de modo que se pueda identificar cuál es la parte de adelante, ver [figura 10](#).



Fig. 10. Móvil y plataforma con obstáculos

La prueba de funcionamiento del sistema comienza con la creación del escenario, ver [figura 11](#), en esta se observa el resultado de esta opción. En la gráfica superior derecha de la [figura 11](#) se observa la matriz binaria resultante.

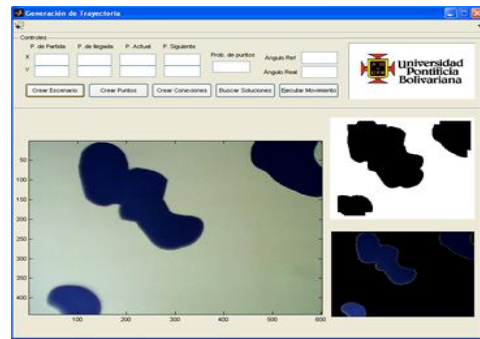


Fig. 11. Creación de Escenario.

Una vez creado el escenario se continúa con la creación de puntos de referencia que permitan el movimiento del móvil a cualquier punto en la zona libre. Para este caso se ubica el móvil en el rango visible de la cámara para que se establezca el punto de partida y se ingresa el punto de llegada, se utiliza una probabilidad de puntos de 0.0002 y se hace clic en el botón *crear puntos*. Ver [figura 12](#).

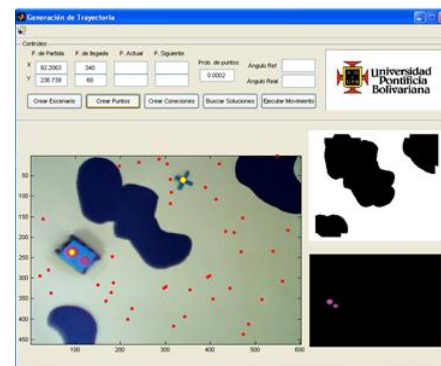


Fig. 12. Creación de Puntos

Ahora bien, al hacer clic en *buscar soluciones* el sistema automáticamente comienza a crear rutas aleatoriamente que solucionan el problema y escoge la más corta. Ver [figura 13](#).

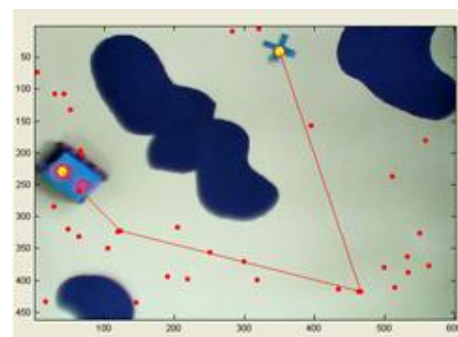


Fig. 13. Ruta más corta

Al *iniciar el movimiento*, el programa le envía las señales al móvil para que ejecute la trayectoria, controlando que el ángulo de la línea azul sea igual al de la línea roja, y el punto de adelante que es el mas pequeño del móvil esté cerca al próximo punto de referencia de la ruta. Ver [figura 14](#).



Fig. 14. Control de trayectoria

Se realizaron diferentes pruebas para el seguimiento de rutas. En una primera prueba se hace funcionar el control de ángulo; para visualizar la diferencia entre el ángulo deseado y el ángulo real se grafican las líneas que unen los puntos de atrás y deseado con el de adelante. Ver [figura 14](#). Se muestran las líneas roja para el ángulo deseado y azul para el ángulo real. En esta prueba se estimaron los parámetros de iluminación para lograr una “visión” de las zonas de interés que permitiera un funcionamiento adecuado del móvil.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema de procesamiento de imágenes y localización de los puntos del móvil, se siguió con la sintonización del PID. En este proceso surgieron varios inconvenientes debido a problemas con el control de los motores DC empleados, los cuales no permitían velocidades muy bajas, por tal motivo para pequeños errores, cuando se requerían una velocidad pequeña, no había respuesta de los motores, ante lo cual la acción integral aumentaba la velocidad hasta que el móvil se comenzara a mover, el cual realizaba movimientos muy bruscos y nuevamente caía en error. Esta situación generaba mucha oscilación y era muy complicado su control. De esta manera se usó un control ON – OFF, de pulsos controlados. Con este se logró disminuir el tiempo de estabilización hasta en un 200%.

A continuación se muestra la prueba de seguimiento con el control ON- OFF. Esta permite ver la diferencia entre la ruta planteada y la trayectoria real del móvil, ver [figura 15](#).

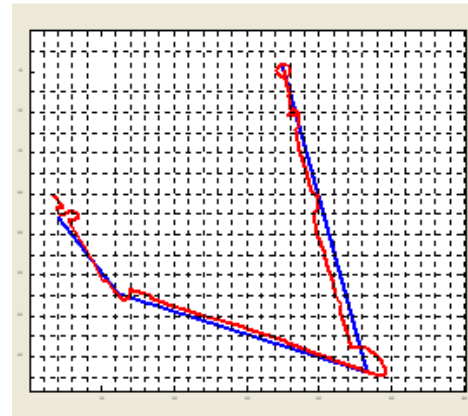


Fig. 15. Ruta planteada (azul) y trayectoria Real (rojo)

5. CONCLUSIONES

La planeación de rutas representa un gran reto en el área de la robótica, necesitándose para su solución un fuerte trabajo matemático y estadístico, esto debido a que en escenarios irregulares los métodos determinísticos generalmente no funcionan, y los métodos probabilísticos suponen un problema de optimización. La utilización del método de búsqueda de rutas probabilísticamente en este trabajo permitió en la mayoría de los casos encontrar soluciones al problema pero no siempre resultaban las más óptimas, en ocasiones hubo necesidad de repetir la opción de *buscar soluciones* para encontrar soluciones aceptables.

Otro de los puntos complejos enfrentado en este trabajo fue la planeación de trayectoria, con la cual se busca que el móvil siga la ruta establecida, lo que requiere un sistema de control bastante preciso y el conocimiento de la posición del móvil en cada instante para evitar posibles errores.

Cuando se trabaja con sistemas de procesamiento de imágenes se deben tener en cuenta varios factores para mejorar el comportamiento del sistema de control, como la calidad de la cámara, los patrones a reconocer y la iluminación del ambiente. Un análisis de estos requerimientos es

un paso fundamental para el buen funcionamiento del sistema.

El análisis práctico del comportamiento del sistema fue determinante en el momento de la optimización del control, e incluso permitió observar que la utilización de otro tipo de controlador podía ser más eficiente que el control propuesto. Se debe tener en cuenta que el controlador a utilizar debe estar contextualizado con el sistema al que se aplica. Para el control angular del móvil, fue más eficiente un control ON-OFF que uno tipo PID.

REFERENCIAS

- Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer C., Aracil R., *Fundamentos de Robótica*. Editorial McGraw-Hill. 1998
- Cerón A. Desarrollo de un Robot Móvil teleoperado con visión remota. *IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation 2005*. IEEE-Colombia. ISBN: 958-695-182-0.
- Dudek G. Computational principles of mobile robotics, *Cambridge University Press, 2000*.
- Fitch R. 3D Rectilinear Motion Planning with Minimum Bend Paths. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001*.
- González, R., y Woods, R., *Tratamiento Digital de Imágenes*, (USA, copublicación de Addison-Wesley Iberoamericana S.A. y Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1996.
- González, R., Woods, R., Eddins, S., *Digital Image Processing Using Matlab®*. Ed. McGraw Hill, Pearson Education, 2004.
- Martín del Brío, B., Sanz A., *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. México, AlfaOmega. 2002.
- Ollero, Aníbal. Robótica, *Manipuladores y Robots Móviles*. Barcelona, Marcombo, 2001.
- Rentería, A., Rivas, M., *Robótica Industrial*. Fundamentos y Aplicaciones. Editorial McGraw-Hill. 2000.
- Song G. Randomized Motion Planning for Car-like Robots with C-PRM, *Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001*.

SOBRE LOS AUTORES

Julio César Castellanos Eljach

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería. Especialista en Automatización de Procesos Industriales de la Universidad de los Andes. Magister en Gestión de la Innovación de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Área de interés investigativo: Automatización e Innovación.

Carlos Mario Araujo Berrocal

Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería. Especialista en Gerencia de proyectos. Áreas de interés investigativo: procesamiento digital de señales.