

Módulo Robótico para la Clasificación de Lulos (Solanum Quitoense) Implementando Visión Artificial*

Robotic Module for Lulo (Solanum Quitoense) Classification Using Computer Vision

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 25 de febrero de 2014. - Fecha de Aceptación: 21 de mayo de 2014.

Pedro Alexander Contreras Parada

Ingeniero en Mecatrónica. Universidad de Pamplona. Pamplona (Colombia). pedro.contreras@unipamplona.edu.co

César Augusto Peña Cortés

Doctor en Automática y Robótica, Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores, ingeniero electromecánico. Universidad de Pamplona. Pamplona (Colombia). cesarapc@unipamplona.edu.co

Cristhian Iván Riaño Jaimes

Magíster en Controles Industriales, ingeniero en Mecatronica. Universidad de Pamplona. Pamplona (Colombia). cristhian.riano@unipamplona.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

P. A. Contreras Parada, C. A. Peña Cortés, and C. I. Riaño Jaimes, "Módulo Robótico para la Clasificación de Lulos (Solanum Quitoense) Implementando Visión Artificial," *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 51–62, 2014.

Resumen: En este artículo se expone el diseño e implementación de un módulo robótico para la clasificación de lulos integrando técnicas de control, visión artificial y robótica. El proceso que permite la clasificación de lulos opera sobre algoritmos para el control de un brazo robótico de 5 GDL, que basado en la información obtenida con técnicas de visión de artificial permite seleccionar lulos con características previamente definidas por el usuario, como son tamaño, color e imperfecciones en el fruto. Se inicia realizando un diseño CAD del módulo, el cual permite establecer las propiedades físicas, definir materiales, técnicas de fabricación y realizar estudio de movimiento de los distintos mecanismos involucrados en el proceso. Se implementaron los algoritmos de control, la cinemática del brazo robótico y los algoritmos de visión artificial. El resultado se resume en un módulo robótico de carácter académico que permite la clasificación de lulos.

Palabras clave: Visión Artificial, Brazo Robótico, Cinemática Inversa, Cinemática Directa.

Abstract: This paper describes the design and implementation of a robotic module for Solanum Quitoense classification using control techniques, computer vision and robotics. The process that allows the classification of Solanum Quitoense (or lulo) operates on algorithms to control a 5 degrees-of-freedom robotic arm that, based on the information obtained from computer vision techniques, selects lulos with features previously defined by the user, such as size, color, and imperfections in the fruit. Everything starts by making a CAD module design which allows establishing physical properties, defining materials and manufacturing techniques and performing a motion study of the different mechanisms involved in the process. Subsequently, control algorithms, robotic arm kinematics and computer vision algorithms are implemented. The result is summarized in an academic-based robotic module that allows lulo classification.

Keywords: Computer Vision, Robotic Arm, Inverse Kinematics, Forward Kinematics.

* Artículo derivado del proyecto titulado "Cultivo Robótico Remoto (2012-2015)". Semillero de Investigación de Automatización, Robótica y Control. Grupo de Investigación de Automatización y Control (A & C), Universidad de Pamplona.

I. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta una aplicación de selección y clasificación de lulos. Las industrias requieren hacer una inspección sobre sus productos ya sea:

para cumplir con políticas de calidad o actividades que forman parte del proceso para concebir un producto. El trabajo de selección y clasificación demanda capacidades humanas que se pueden ver comprometidas en ciertos momentos [1]. Este proyecto se presenta como alternativa de solución a los métodos manuales integrando técnicas de procesamiento de imágenes y mecanismos robóticos para cumplir con este fin [2]. Se logró integrar áreas de la ingeniería como la robótica, visión artificial y control, áreas que por las exigencias actuales se caracterizan por su tendencia creciente, especialmente en la industria, donde sus funciones orientadas a manipular herramientas, posicionar objetos y mecanizado, entre otras, se han quedado cortas para entornos cambiantes y situaciones que demandan un nivel de autonomía superior en los robots [3-6].

Esta investigación comprende el estudio, diseño y desarrollo de un sistema robotizado para la clasificación de lulos. La etapa de estudio incluye tanto el análisis cinemático directo como el inverso para definir los criterios de diseño [7]. En el diseño del prototipo Virtual se aplicó la metodología QFD, complementada con modelado CAD, que permite obtener la ruta de ensamble y construcción del proyecto [8]. El prototipo CAD virtual define las propiedades físicas, dimensiones y apariencia del sistema robótico. Se desarrollan los algoritmos de visión artificial y se realiza la implementación y puesta a punto del sistema [9]. El sistema se sometió a distintas pruebas para validar y verificar el correcto funcionamiento del módulo. Este artículo finaliza con la presentación de los resultados.

II. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO ROBÓTICO

Se define el módulo para selección y clasificación de lulos como robótico, ya que sus características corresponden a las definiciones adoptadas tanto por la Organización Internacional de Estándares (ISO) como la asociación, Robotic Industry Association (RIA). El módulo robótico es un manipulador multifuncional con estructura mecánica y elementos sensores que permite ser controlado y reprogramado; adicionalmente posee la capacidad de identificar y seleccionar las frutas maduras ejerciendo un desplazamiento sobre ellas en unas trayectorias programadas.

El módulo robótico consta de una banda transportadora, un banco de visión artificial y un brazo robótico. Este último está formado por eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones conse-

cutivos. Los actuadores tienen por tarea generar movimiento en los elementos del robot según órdenes dadas por la unidad de control. La fuente de energía empleada es energía eléctrica, por la conveniencia para las características de potencia, precisión, peso y coste demandadas para el proyecto. Se diseñó un efector final que facilita la sujeción de la fruta sin golpearla o causarle daño, lo cual tiene como ventaja el ajuste a su forma esférica [8].

Para determinar la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del efector final se solucionó problema cinemático que consiste en encontrar la relación entre la posición del efector final y los ángulos (o posiciones) de las articulaciones [7].

El modelo dinámico del robot se obtuvo por medio del algoritmo computacional de Lagrange-Euler, y a través de la implementación del control cinemático se establecen las trayectorias para cada articulación a lo largo del tiempo. Las perturbaciones producto de rozamientos o fricción, holgura en los elementos e inercia son difíciles de establecer por ser de carácter variable; para lo cual se utilizó el control dinámico, que tiene como misión procurar que las trayectorias realmente seguidas por el robot sean muy parecidas a las propuestas por el control cinemático, lo cual conlleva a la implementación de un control multiarticulador [10].

III. ESTUDIO CINEMÁTICO DEL ROBOT

Para la solución del problema cinemático directo del robot antropomórfico de 5 grados de libertad se utilizó el algoritmo de Denavit Hartenberg. La relación matricial de cada eslabón ' i ' con respecto al sistema de referencia del eslabón anterior ' $i-1$ ' con matrices de 4×4 garantiza el cálculo rápido de la posición del efector, utilizando un método matricial se implementa y se ejecuta en el software de control. Cada articulación tiene un sistema de referencia solidario, lo cual permite relacionar direcciones y distancias entre los mismos eslabones. Para pasar de un sistema de referencia a otro es necesario utilizar 2 traslaciones y dos rotaciones. La Fig. 1 representa los sistemas coordenados solidarios a cada eslabón i , hallados por el método de Denavit-Hartenberg [7], [10].

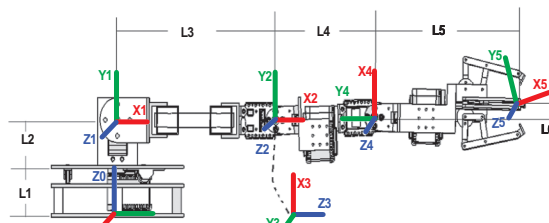


Fig. 1. Esquema de sistemas coordenados del robot para la cinemática directa

Fuente: Autores.

La tabla I muestra el cálculo de los parámetros de Denavit Hartenberg del robot de 5 grados de libertad.

TABLA I. PARÁMETROS DE DENAVIT HARTEMBERG

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1+90°	$L1+L2$	$\sqrt{L5^2 + L6^2}$	90°
2	q_2	0	$L3$	0
3	q_3+90°	0	0	90°
4	q_4	$L4$	0	-90°
5	$q_5-90^\circ + \text{atan2}(L6,L5)$	0		0
4	q_4	$L4$	0	-90°
5	$q_5-90^\circ + \text{atan2}(L6,L5)$	0	$\sqrt{L5^2 + L6^2}$	0

Cinemática Inversa

Las matrices de transformación homogénea tienen la forma

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde ‘ \mathbf{n} ’, ‘ \mathbf{o} ’ y ‘ \mathbf{p} ’ representan las direcciones de los ejes ‘X’, ‘Y’ y ‘Z’ del sistema ‘ i ’ con respecto al sistema ‘ $i-1$ ’, formando una matriz de 3x3 llamada “matriz de rotación”. El vector columna ‘ \mathbf{p} ’ representa la ubicación del sistema de referencia coordinado ‘ i ’ con respecto a ‘ $i-1$ ’.

El cálculo de cinemática inversa se obtiene relacionando la forma geométrica del robot con los movimientos espaciales de sus articulaciones [11]. Pueden ocurrir singularidades al existir más de una posible solución al problema. Se ubica el robot en ciertas condiciones geométricas para hacer desacoplos analíticos y calcular las variables articulares [11].

En el punto de la muñeca la ubicación depende únicamente de los tres primeros grados de libertad. Para desacoplar el brazo del resto de articulaciones se halla la ecuación que calcula la muñeca en función de la estructura del último eslabón y la dirección del efector final. El sistema coordinado de 5 con respecto a 0 se define:

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P} - (\sqrt{L_6^2 + L_5^2})\mathbf{n} \quad (2)$$

Donde \mathbf{P}_m tiene las coordenadas de la muñeca (p_{mx}, p_{my}, p_{mz}) , $\sqrt{L_6^2 + L_5^2}$ es la distancia dependiente de la arquitectura del robot, y \mathbf{n} es la dirección del eje x de 5 con respecto a 0. La Fig. 2 muestra la geometría estudiada:

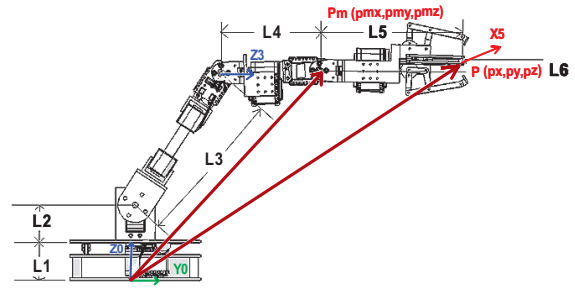


Fig. 2. Punto geometría estudiada (muñeca)
Fuente: Autores.

La muñeca en el plano de referencia ‘XY’ tiene la siguiente distancia del origen:

$$m = \sqrt{p_{mx}^2 + p_{my}^2} \quad (3)$$

La primera articulación depende de la ubicación de la muñeca (ver Fig. 3), así:

$$q_1 = -\text{atan2}(-p_{mx}, p_{my}) \quad (4)$$

En el espacio tridimensional ‘XYZ’ la muñeca (\mathbf{P}_m) está a una distancia del origen:

$$R = \sqrt{(p_{mz} - L_1 - L_2)^2 + m^2} \quad (5)$$

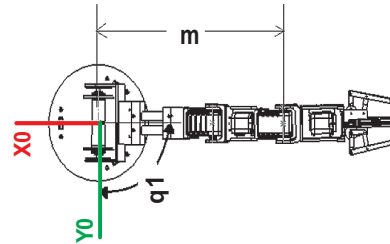


Fig. 3. Relación geométrica del primer grado de libertad
Fuente: Autores.

Utilizando relaciones trigonométricas se puede deducir:

$$\cos(q_3) = \frac{(R^2 - L_3^2 - L_4^2)}{2 L_3 L_4} \quad (6)$$

$$\text{sen}(q_3) = \pm \sqrt{1 - \cos^2(q_3)} = \text{codo} \sqrt{1 - \cos^2(q_3)} \quad (7)$$

La nueva variable ‘codo’ es el signo positivo o negativo que corresponde a las configuraciones codo abajo o codo arriba. El ángulo de la tercera articulación está dada por

$$q_3 = \text{atan2}(\text{sen}(q_3), \cos(q_3)) \quad (8)$$

La segunda articulación (ver Fig. 4) se relaciona geoméricamente de la siguiente manera:

$$\text{Alfa} = \text{atan2}(p_{mz} - L_1 - L_2, m) \quad (9)$$

$$\text{Beta} = \text{atan2}(L_4 \sin(q_3), L_3 + L_4 \cos(q_3)) \quad (10)$$

$$q_2 = \text{Alfa} - \text{Beta} \quad (11)$$

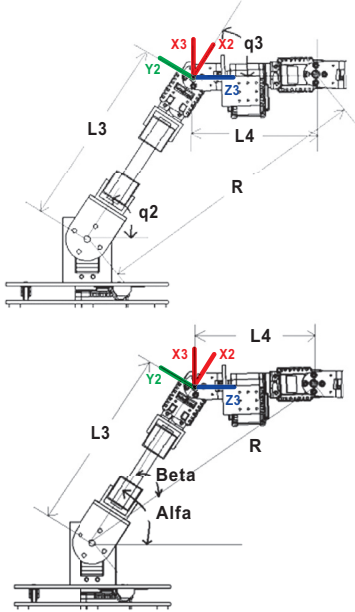


Fig. 4. Relaciones geométricas de los tres primeros grados de libertad
Fuente: Autores.

Para el cálculo de las dos últimas articulaciones se aprovecha que las direcciones de X_5 y Z_4 coinciden.

$$Z_5 = Z_4 \quad (12)$$

Con los pasos anteriores se hallan las matrices de transformación homogénea con respecto al sistema de referencia de 1, 2 y 3, para contar con sus direcciones de X, Y y Z.

Como se ilustra en la Fig. 5, el sistema de referencia 4 gira con respecto al eje de Z_3 , por lo tanto, al aplicar producto punto como se muestra en (13) y (14) se obtiene q_4 .

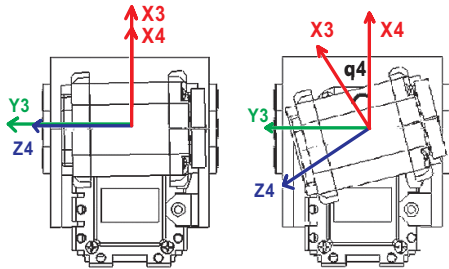


Fig. 5. Relación angular cuarto grado de libertad
Fuente: Autores.

$$Y_3 \cdot Z_4 = \cos(q_4) \quad (13)$$

$$X_3 \cdot Z_4 = \cos(90 + q_4) = -\text{sen}(q_4) \quad (14)$$

$$q_4 = \text{atan2}(-X_3 \cdot Z_4, Y_3 \cdot Z_4) \quad (15)$$

Donde Y_3 y X_3 son los vectores columna n y o de 0A_3 (ver Fig. 5).

Para hallar el último valor angular se puede observar que el sistema de referencia de 5 gira con respecto al eje Z_4 , que es conocido por la multiplicación de matrices de transformación homogénea.

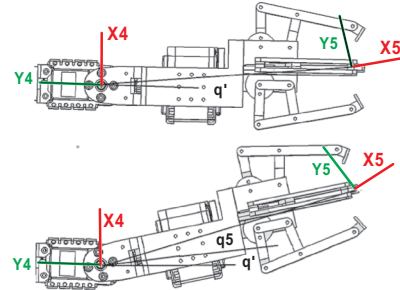


Fig. 6. Diagrama Relación angular quinto grado de libertad
Fuente: Autores.

Debido a que el efector final no se encuentra alineado con eslabón (ver Fig. 6), se hace necesario calcular el del ángulo q' , por medio de las medidas del eslabón L_5 y el desfase L_6 , como

$$q' = \text{atan2}(L_6, L_5) \quad (16)$$

Con lo cual se puede deducir:

$$X_4 \cdot Y_5 = \cos(q_5 + q') \quad (17)$$

$$X_4 \cdot X_5 = \text{sen}(q_5 + q') \quad (18)$$

Por lo tanto:

$$q_5 = \text{atan2}(X_4 \cdot X_5, X_4 \cdot Y_5) - q' \quad (19)$$

Donde X_5 y Y_5 son los vectores columna n y o de 0A_5 y X_4 es el vector columna n de la matriz 0A_4 (ver Fig. 6).

IV. DISEÑO Y DESARROLLO DEL MÓDULO ROBÓTICO

Partiendo del estudio del cinemático, el espacio de trabajo y teniendo las dimensiones para el brazo robótico, se procede al diseño del prototipo digital en CAD de cada una de las piezas necesarias para construir el módulo robótico. Se hace necesario cumplir con este objetivo para satisfacer los requerimientos tanto económicos que son limitados y de construcción que se deben adecuar a las herramientas que tenemos a disposición. El programa seleccionado para el diseño CAD es *SolidWorks*. En este programa se realizó el modelo 3D de cada una de las piezas y los conjuntos, y se obtuvieron tanto planos como la in-

formación de las propiedades físicas necesaria para la construcción y desarrollo del prototipo. El proceso de diseño consistió en formalizar la idea del bosquejo preliminar, construyendo las piezas y ensamblajes para luego obtener planos, desarrollos y distribución.

Terminadas las piezas del prototipo se realizó un ensamble para cada eslabón del robot; además se creó un sistema coordinado para visualizar las direcciones de X , Y , Z que corresponde a los colores rojo, verde y azul, respectivamente. Las siguientes gráficas exponen el trabajo realizado y su descripción.

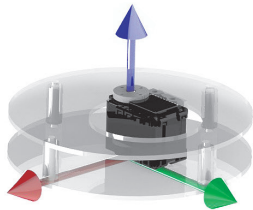


Fig. 7. Ensamble base del robot
Fuente: Autores.

En la Fig. 7 se puede observar el ensamble del primer eslabón del robot, la base. Es un mecanismo que le permite el giro de 360° por medio del control de un Servo Dynamixel AX12. Diseñado para ser construido en acrílico de 3 mm.

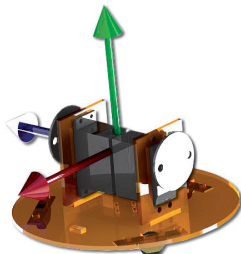


Fig. 8. Eslabón número 1
Fuente: Autores.

En la Fig. 8 se puede observar la base del robot, la cual está compuesta por un Servo Dynamixel AX12, un conjunto (ensamble) de dos láminas de acrílico circulares y 4 tornillos.

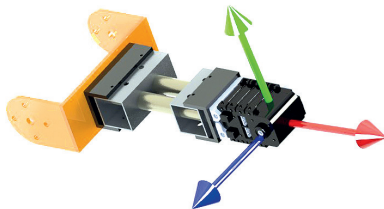


Fig. 9. Eslabón número 2
Fuente: Autores.

En la Fig. 9 se presenta el segundo eslabón, el cual está compuesto por un Servo Dynamixel AX12, un ensamble de acrílico y 2 perfiles huecos de alu-

minio. Este eslabón se diseñó de modo que permita ajustar su distancia y, a su vez, el reemplazo en caso de ser necesario para aumentar su longitud.

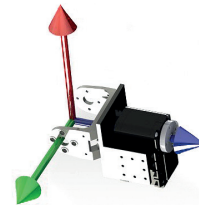


Fig.10. Eslabón número 3
Fuente: Autores.

En la Fig. 10 se puede observar el tercer eslabón, el cual está compuesto por un Servo Dynamixel AX12 y una estructura de acrílico para facilitar su ensamble.

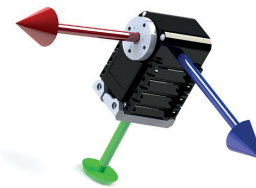


Fig. 11. Eslabón número 4
Fuente: Autores.

En la Fig. 11 se puede observar el cuarto eslabón, el cual está compuesto por un Servo Dynamixel AX12.

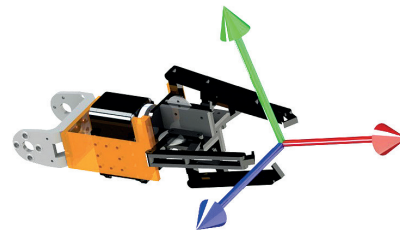


Fig. 12. Eslabón número 5
Fuente: Autores.

En la Fig. 12 se puede observar el quinto eslabón, el cual está compuesto por un Servo Dynamixel AX12, una base de acrílico y un efector final.

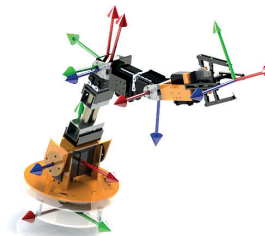


Fig. 13. Estructura mecánica CAD ejes coordenados X , Y y Z . Rojo, verde y azul, respectivamente
Fuente: Autores.

En la Fig. 13 se muestra el ensamble final del brazo. La imagen es un renderizado del diseño en CAD del brazo antropomórfico.

A. Herramienta Final de Control

El diseño del efector final se realizó para satisfacer los requerimientos de la aplicación. Las cuatro pinzas que lo conforman ofrecen un mejor agarre al producto y cuenta con un espacio en el interior del mismo, con la forma promedio de la fruta para no causarle ningún daño al sujetarla. Estas pinzas están ensambladas con cuatro engranes que se encuentran en la base del efector final; los engranes son movidos a través de un mecanismo tornillo sin fin que atraviesa el centro de la base. Un roboservo configurado en giro continuo mueve el tornillo sin fin. Las pinzas se abren y cierran en una duración de 13 segundos para una velocidad de giro del tornillo sin fin de 200 rpm. El efector final puede almacenar objetos esféricos con un diámetro máximo 5 cm y mínimo de 5 mm. La Fig. 14 muestra la imagen del efector final [12], [13].

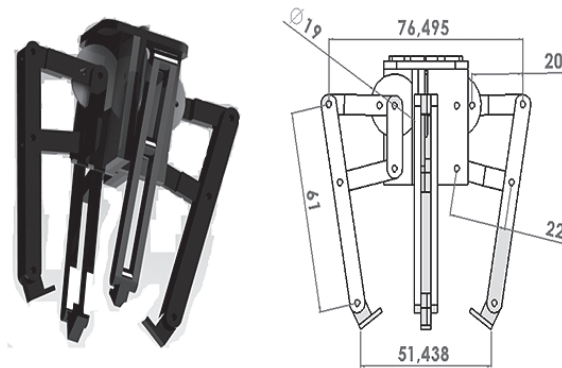


Fig. 14. Estructura del Gripper o efector final
Fuente: Autores.

B. Diseño de la Banda Transportadora, Compacto a la Caja de Conexiones

Se utilizó una técnica de resolución de problemas específicos que permitió cumplir con los requerimientos del usuario en el diseño; se empleó el despliegue de la función de calidad (QFD) [8], [14], [15], en la que se identificó claramente los requisitos que el módulo debía cumplir; como requisitos indispensables se fijó que el diseño fuera compacto, eficiente y adaptable a cambios del producto que se va a clasificar. Con base en esto se diseñó un sistema modular que contiene un espacio para las conexiones electrónicas; este incluye un compartimiento móvil que permite fácil acceso a la hora de ajustar los circuitos electrónicos; en la estructura está inmersa una banda transportadora que se puede desmontar con facilidad,

además presenta un panel de control con indicadores y un botón de paro emergente; para finalizar, una base, la cual sujeta una cámara digital. En la Fig. 15 se puede visualizar la estructura soporte módulo robótico.

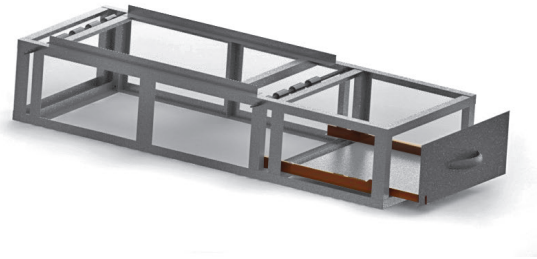


Fig. 15. Diseño estructura soporte módulo robótico
Fuente: Autores.

En la Fig. 16 se puede visualizar el conjunto final ensamblado, donde se observan: robot, cámara digital, caja de conexiones, panel de control y banda transportadora y su disposición final lista para ser ensamblada.

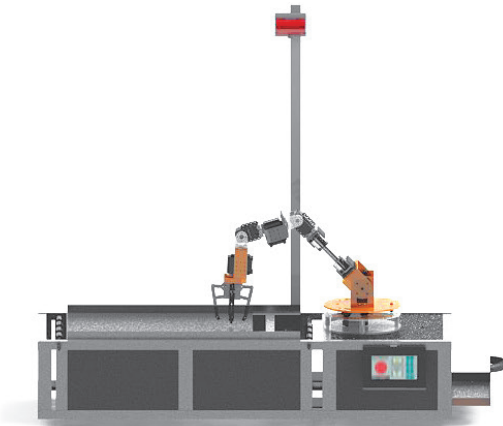


Fig. 16. Diseño CAD del Prototipo ensamblado
Fuente: Autores.

V. TÉCNICA DE VISIÓN ARTIFICIAL

El procesamiento digital de imágenes se desarrolla desde el punto de vista matricial, en el que se considera la imagen como una matriz y el elemento denominado pixel en la fila i columna j tiene un valor asociado comúnmente entre 0 (negro) y 255 (blanco) o entre 0 y 1, respectivamente [16].

Para el proceso de selección se tiene en cuenta las frutas verdes, maduras, grandes y pequeñas, que se clasificaron en cuatro tipos:

- Tipo 1: Lulo Verde Grande.
- Tipo 2: Lulo Verde Pequeño.
- Tipo 3: Lulo Maduro Grande.
- Tipo 4: Lulo Maduro Pequeño

El procedimiento de clasificación inicia capturando la imagen del fruto (lulo) sobre la banda transportadora. Esta imagen tiene una resolución de 640x480 pixeles. La imagen obtenida en la captura es la mostrada en la Fig. 17.



Fig. 17. Captura de imagen para procesamiento
Fuente: Autores.

Una vez obtenida la imagen, se identifican las características más relevantes, que permiten diferenciar los frutos, y así lograr un óptimo trabajo en el procesamiento de la imagen; se empleó los espacios HSV, YCbCr y RGB (figuras 18, 19 y 20, respectivamente); en estos espacios se analizaron sus principales componentes y algunas operaciones matemáticas entre ellas [9], [17], [18].

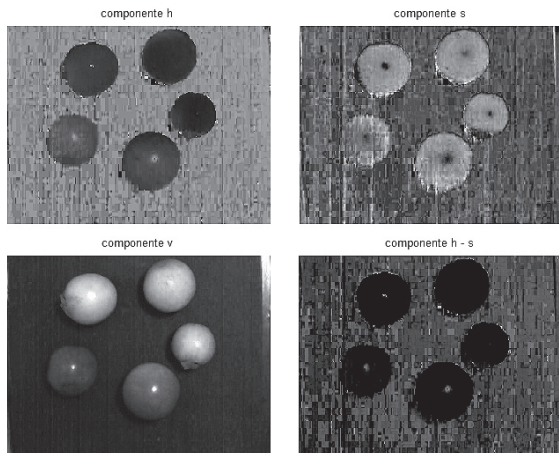


Fig. 18. Espacio HSV
Fuente: Autores.

En la Fig. 18 se observan la principales componentes del espacio HSV, donde se observó que las frutas en este espacio se diferencian claramente del fondo; la segmentación de la imagen en este espacio maneja rangos de 0 a 1, variando la escala de grises de negro a blanco, respectivamente [16], [19].

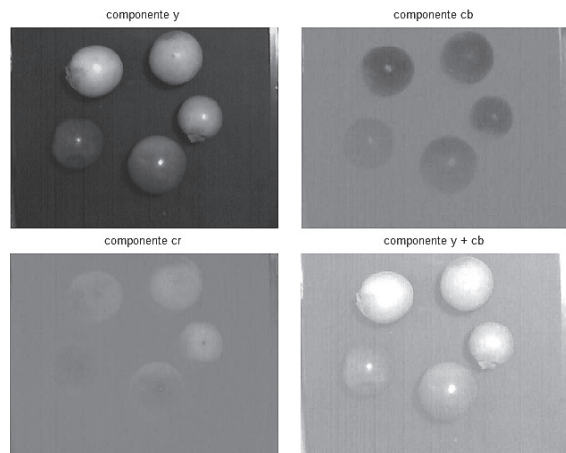


Fig. 19. Espacio YCbCr
Fuente: Autores.

En la Fig. 19 se observan la principales componentes del espacio YCbCr. Se observa que la componente Cr no identifica muy bien los lulos de color verde; este espacio maneja rangos de segmentación de 0 a 255 en escala de grises.

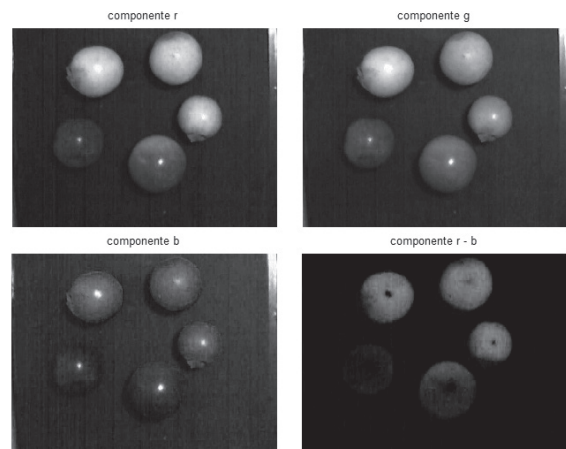


Fig. 20. Espacio RGB
Fuente: Autores.

En la Fig. 20 se observan las principales componentes del espacio RGB. Se observa que la componente B presenta valores muy cercanos a la superficie de la banda transportadora, teniendo como consecuencia problemas en la identificación; este espacio maneja rangos de segmentación de 0 a 255 en escala de grises.

La selección de los espacios se hace conforme a las características de la imagen que se va a procesar. Se empleó el espacio HSV, donde la componente V se usó para identificar las frutas maduras y la resta de la componente S a la componente H para identificar todas las frutas (ver Fig. 21).

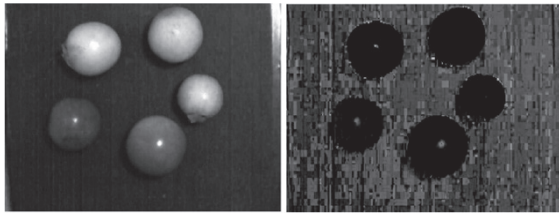


Fig. 21. Componentes (v) y (h-s) del espacio HSV
Fuente: Autores.

Para segmentar la imagen de la componente V se tomaron los valores de 0.4 a 1 para convertir a blanco y los valores menores a 0.4 para convertir a negro. La Fig. 22.A muestra la operación realizada.

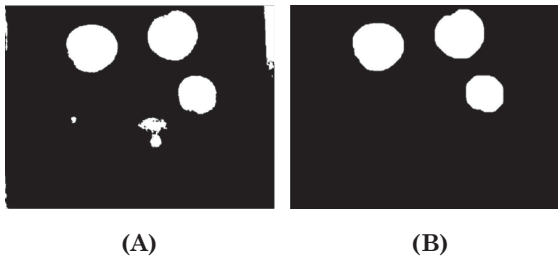


Fig. 22. Operaciones de umbralización
Fuente: Autores.

En la Fig. 22.A se observó que la imagen requería de otras operaciones para seleccionar solo la fruta madura; aplicando técnicas de procesamiento (eliminación de áreas pequeñas) se obtuvo la matriz representada en la gráfica 22.B, en la que se observa solo los frutos (lulo) maduros.

Para segmentar la imagen de la componente (h-s) se tomó el valor de 0 para convertir a blanco y los valores mayores que 0 para convertir a negro. La Fig. 23.A muestra la operación realizada.

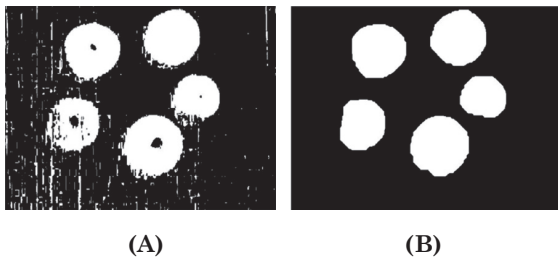


Fig. 23. Eliminación de ruido
Fuente: Autores.

En la Fig. 23.A se observó que la imagen presentaba ruido y que requería de operaciones de procesamiento para eliminar este ruido. En la Fig. 23.B se observa el resultado luego de aplicar el procesamiento [20].

Al obtener la Fig. 23.B (todos los frutos) y restarles los frutos maduros, se obtienen los frutos verdes.

En la Fig. 24.B se observan los frutos seleccionados (frutos verdes) luego de las operaciones de procesamiento.



Fig. 24. Selección de frutos verdes
Fuente: Autores.

Posteriormente se clasifican los frutos verdes y maduros, respectivamente; al determinar el área de los frutos se pueden clasificar por tamaño. Se determinó que un fruto pequeño era aquel que posee menos de 8000 píxeles, y fruto grande, el que tiene más de la cantidad mencionada. En la siguiente gráfica se muestran los frutos clasificados.



Fig. 25. Clasificación por color y tamaño del lulo
Fuente: Autores.

En la Fig. 25 se observa que el proceso de clasificación arrojó resultados satisfactorios; en la siguiente tabla se indican los valores de área y centro obtenidos en la imagen; para visualizar los valores se describieron de izquierda a derecha (ver Fig. 25 y tabla II).

TABLA II. CENTRO Y ÁREA DE LOS LULOS

		Grande Verde	Grande Maduro	Grande Verde	Grande Maduro	Pequeño Maduro
centro	X	167.88	206.97	351.07	399.64	457.71
	Y	278.54	100.00	328.19	71.75	210.46
área		10530	10635	15275	10524	6361

Fuente: Autores.

El centro en X corresponde a los pixeles en las filas de izquierda a derecha; el centro en Y corresponde a los pixeles de las columnas de arriba hacia abajo. Los datos de la tabla 2 se pueden verificar en la Fig. 25.

La distancia real con la distancia mostrada en la imagen se relaciona utilizando la siguiente ecuación:

$$D = \frac{d_r C}{d_p} + d \quad (20)$$

Donde

- D : distancia real en 'X' o 'Y' desde el sistema de referencia del robot antropomórfico al centroide del objeto en la imagen.
- C : Valor en pixeles en 'X' o 'Y' del centroide de los objetos en la imagen.
- d_p : distancia a lo ancho o largo en pixeles de la imagen.
- d_r : distancia real a lo ancho o largo del área capturada por la cámara.
- d : Distancia real en 'X' o 'Y' desde el centro origen del robot al punto (0,0) de la imagen.

Con la ecuación 20 se puede encontrar en el plano XY del robot la posición de la fruta. Usando la cinemática inversa, una distancia 'Z' de 1 cm, para no chocar con la banda, y suponiendo que el ángulo del gripper va a ser perpendicular a la banda cuando se vaya a tomar el objeto, el robot se podrá desplazar hasta esa posición sin problemas.

VI. CONTROL CINEMÁTICO

El control de un robot se usa para mejorar la calidad de los movimientos [21]. Con el control cinemático se elige el tipo de trayectoria que las articulaciones o el efector final deben seguir. Uno de los métodos tradicionales es la trayectoria punto a punto, que se divide en movimiento eje a eje, simultáneo de ejes y asíncronas. Estos movimientos tienen un perfil de posición, velocidad y aceleración que está determinado por las propiedades del motor y de la ruta deseada. Dependiendo si el trayecto angular es suficiente para alcanzar la aceleración máxima de cada motor, se experimenta una etapa de velocidad constante [22].

Una de las funciones del control cinemático es unir una sucesión de puntos, por lo que se quiere que pasen las articulaciones en un tiempo dado. Además de restricciones de posiciones y tiempo es conveniente añadir la velocidad y aceleración para asegurar trayectorias suaves y eliminar velocidades y aceleraciones máximas. Para llevar a la práctica lo anteriormente mencionado se implementaron algunos de los interpoladores más frecuentes: el lineal, cubico y trapezoidal [23].

La Fig. 26 presenta los perfiles de velocidad, aceleración y posición de la segunda articulación para un tramo de la rutina programada.

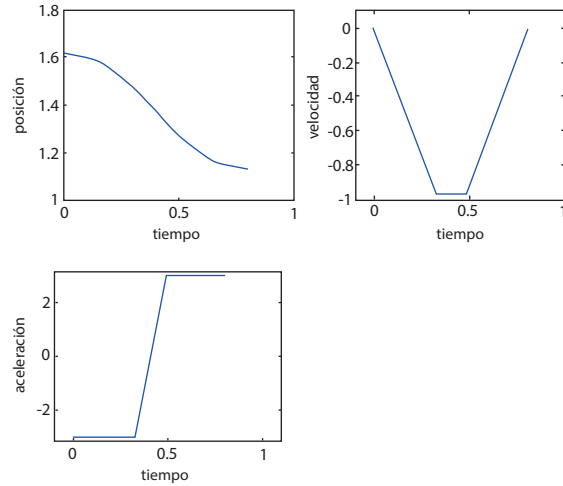


Fig. 26. Gráfica de la posición, velocidad y aceleración vs tiempo del 2 GDL

Fuente: Autores.

VII. CONTROL DINÁMICO

La dinámica del robot se utiliza para encontrar ecuaciones que aproximen el comportamiento del brazo robótico teniendo en cuenta el peso, fuerzas, perturbación, inercias, gravedad y demás factores que afecten directamente el movimiento. El modelo dinámico es calculado con la formulación de Lagrange-Euler. Como resultados se tienen las ecuaciones que permiten hallar el vector de torques aproximado del robot.

La formulación lagrangiana establece la ecuación

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \dot{q}_i} - \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta q_i} = \tau \quad (21)$$

$$\mathcal{L} = k - U \quad (22)$$

- q_i : Coordenadas generalizadas (articulares).
- τ : Vector de fuerzas y pares aplicados en las .
- \mathcal{L} : Función lagrangiana.
- k : Energía cinética.
- U : Energía potencial.

Se utiliza el Teorema de Steiner, que relaciona la inercia de los eslabones referida al centro de gravedad por el cuadrado de la distancia entre el punto 0 y el punto correspondiente al centro de gravedad.

$$I_0 = I_{CG} + \bar{d}_{0CG}^2 masa \quad (23)$$

Se supone en la última articulación un peso extra que es un aproximado del peso de la carga.

A. Parámetros Dinámicos del Brazo Robótico

El algoritmo de Lagrange-Euler utiliza parámetros propios de la estructura mecánica. Se obtienen las inercias utilizando el diseño CAD, al igual que la estimación de los centros de masa de los eslabones. Cada eslabón se construye en el CAD por separado, y se le asigna el tipo de material a cada pieza para hacer una aproximación de su volumen y densidad, obteniendo sus propiedades físicas. Es importante hacer un sistema de referencia auxiliar que represente la cinemática del robot. En la tabla III se presentan los parámetros dinámicos del robot.

Se ingresaron las ecuaciones del algoritmo computacional para el modelado dinámico por Lagrange-Euler. Se relacionan las matrices de la cinemática directa y se aplica el algoritmo recursivo para llegar a una ecuación de la forma

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) \quad (24)$$

Donde

τ : Matriz de fuerzas y torques.

D : Matriz de inercias.

H : Vector columna de fuerzas de Coriolis y centrífugas.

C : Vector columna de fuerzas de gravedad.

q : Variable articular.

En la dinámica del robot se suponen cada articulación de forma independiente. Las masas de los eslabones tienen un factor de peso extra que supone el peso de los actuadores y se toman concentradas en cada uno de sus centros de gravedad; además se supone que las perturbaciones son pequeñas y que

el factor de reducción de los actuadores es elevado. También se incluyó en la última articulación la masa de la carga que va a ser movida.

B. Selección de Motores

El cálculo de los motores se realizó basado en los máximos pares a los que estará expuesta la estructura del robot.

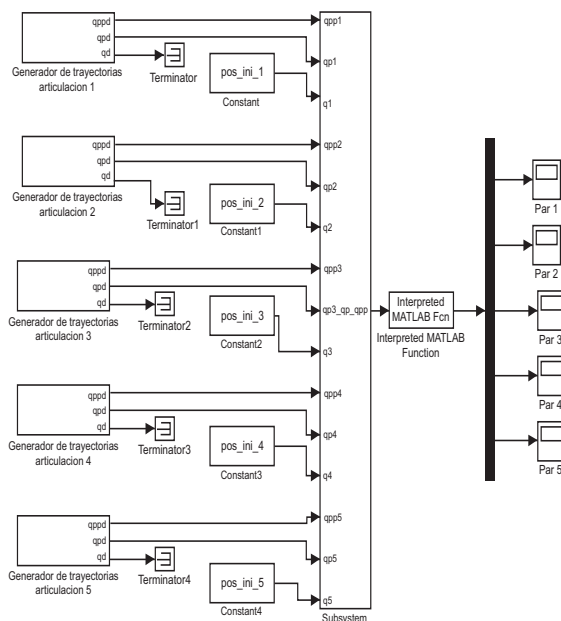


Fig. 27. Cálculo de los pares máximos del robot

Fuente: Autores.

TABLA III. PARÁMETROS DINÁMICOS BRAZO ANTROPOMÓRFICO

N	Masa [g]	Centro de masas [cm]			Momentos de inercia g-[cm ²]		
		x	y	z	Ixx	Iyy	Izz
1	100				1293,38	2308,613	1654,726
		-1,861	-0,0420	2,427	Ixy	Ixz	Iyz
					8,615	-640,79	-14,465
2	156,01				2220,104	6158,22	4319,9
		-3,295	-0,003992	2,56	Ixy	Ixz	Iyz
					0,001813	-527,57	-0,019254
3	134,415				521,936	10263,2	10120,28
		8	-0,00337	1,244	Ixy	Ixz	Iyz
					3,495	1338,636	-0,567
4	103				733,049	855,524	680,729
		-1,729	0,7805	-1,66	Ixy	Ixz	Iyz
					-156,665	330,048	-170,358

Fuente: Autores.

La Fig. 27 representa el esquema del robot con la dinámica inversa. Se utilizó como entradas perfiles de movimiento que estimularan los actuadores. La configuración del robot se determinó en la peor posición para que los resultados mostraran los pares máximos desarrollados [24]. En la Fig. 28 se muestra el resultado que se obtuvo en la simulación de la primera articulación. En la tabla IV se indican todos los resultados de pares máximos hallados en la simulación.

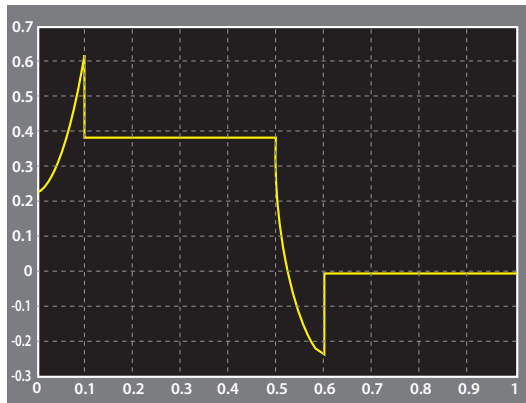


Fig. 28. Par en la primera articulación
Fuente: Autores.

TABLA IV. PARES MÁXIMOS DE LOS ACTUADORES DEL ROBOT

Articulación	Par máximo
1	0.65 N/M
2	1.62 N/M
3	1.27 N/M
4	0.41 N/M
5	0.42 N/M

Fuente: Autores.

En la Fig. 29 se muestra la simulación del brazo antropomórfico, simulando las trayectorias que realiza el efector final. Se aplicaron las trayectorias punto a punto y diferentes interpoladores como el cúbico, trapezoidal y lineal [25].

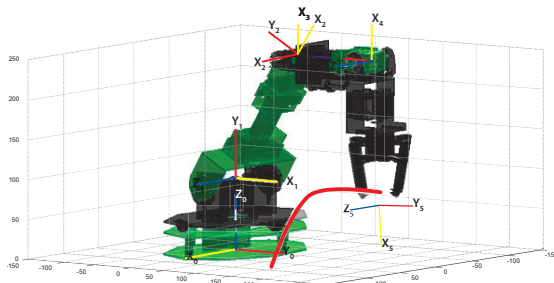


Fig. 29. Simulación de una trayectoria
Fuente: Autores.

VIII. RESULTADOS

En la Fig. 30 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la cinemática inversa retroalimentada por visión artificial, y se ve la precisión en el momento de tomar la fruta para realizar la rutina de clasificación.

Para el proceso de digitalización de imágenes se requirió de distintas pruebas; entre otras, se varió la cantidad de frutas para validar y verificar el correcto funcionamiento del módulo.

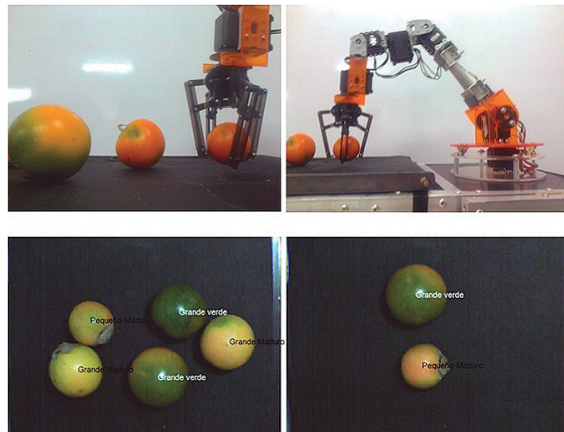


Fig. 30. Módulo clasificador de lulos
Fuente: Autores.

IX. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio cinemático y dinámico, el cual describe correctamente el comportamiento del brazo robótico antropomórfico, con lo cual se logra determinar las coordenadas articulares de los actuadores para conseguir una posición dada del efector final y hallar la posición o desplazamiento de cada uno de sus eslabones a partir de una posición dada. La ubicación del lulo es obtenida por técnicas de visión artificial.

El diseño de los controladores propuestos responde a las condiciones cambiantes provocadas por la dinámica real del módulo robótico, logrando una acción de control en las que se consigue seguir la señal de referencia requerida, demostrando que el controlador final se adecua y se acopla a las variaciones presentadas en la referencia.

Se cumplió con los requerimientos de diseño, empleando metodologías como QFD y técnicas de diseño CAD para el estudio, diseño y desarrollo del módulo; se logró obtener un diseño de módulo robótico con muy buenas prestaciones dinámicas y aptas para las tareas de clasificación de frutas con la posibilidad de ser adaptado a otras frutas de forma similar al lulo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración al grupo de trabajo conformado por Joel Samir Hernández, Jonathan Fernando Soto, Sebastián Rodríguez y Víctor Manuel Páez, por la ayuda prestada para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] J. Billingsley, D. Oetomo, J. Reid, "Agricultural robotics [TC Spotlight]", *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol.16, n° 4, pp.16,16, 19, December 2009.
- [2] A. Ming and H. Ma, "A blob detector in color images", *Proceedings of the 6th ACM international conference on Image and video retrieval*, pp. 364,370, 2007.
- [3] T. Theodoridis and Hu Huosheng, "Toward Intelligent Security Robots: A Survey", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 42, n° 6, pp.1219, 1230, Nov. 2012.
- [4] C. Riaño, C. Peña, and A. Pardo, "Approach in the Optimal Development of Parallel Robot for Educational Applications", *Proceedings of the WSEAS international conference on Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation (ICMS)*, pp.145,150, January 2014.
- [5] C. Peña, E. Yime, and I. Banfield, "Dimensional calculation optimal platform Stewart-Gough type parallel to pedagogical applications using genetic algorithms", *Inge-CUC*, vol. 7, n° 1, pp.127,138, Oct. 2011.
- [6] M. J. Schuster, D. Jain, M. Tenorth, and M. Beetz, "Learning organizational principles in human environments", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3867, 3874, May 2012.
- [7] A. Ollero, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2001, p. 464.
- [8] J. Marsot, "QFD: a methodological tool for integration of ergonomics at the design stage", *Applied Ergonomics*, vol. 36, n° 2, pp.185,192, Mar. 2005.
- [9] L. Sooyeon, K. Youngshin, J. Youn, P. Sehyeok, and K. Jaehyun, "Contrast-preserved chroma enhancement technique using YCbCr color space", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, n° 2, pp. 641, 645, May 2012.
- [10] A. Barrientos, L. Peñin, C. Balaguer, and R. Aracil, *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, Interamericana de España, Ed. 2, pp. 512, 2007.
- [11] I. Zabalza, "Síntesis cinemática y dinámica de mecanismos. Manipulador paralelo 6-RKS", Ph.D. Tesis, Universidad Pública de Navarra, pp.267, Dic. 1999.
- [12] R. Norton, *Diseño de maquinaria*, 4ª ed. Pearson, 2011, p. 888.
- [13] J. Marsot and L. Claudon, "Design and ergonomics. Methods for integrating ergonomics at hand tool design stage", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 10, n° 1, pp. 13-23, 2004.
- [14] C. Jianjie, Y. Suihuai, C. Guoding, and W. Haijun W., "Research on product design quality control methods based on QFD", *IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design (CAIDCD)*, vol.1, n°1, pp. 35,39, 17-19 Nov. 2010.
- [15] Y. Akao, M. Sperry, and R. Fiorentino, "QFD: prendre en compte les besoins du client dans la conception du produit", *Afnor*, Ed. 1, pp. 349, Dic. 1993.
- [16] Chang. Young-Chang and J. F. Reid, J.F., "RGB calibration for color image analysis in machine vision", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 5, n°10, pp.1414,1422, Oct 1996.
- [17] C. Damerval and S. Meignen, "Blob Detection With Wavelet Maxima Lines", *Signal Processing Letters, IEEE*, vol.14, n°1, pp.39,42, Jan. 2007.
- [18] I. Young, J. Gerbrands, and L. Van, "Fundamentals of image processing", *Delft University of Technology*, 2ª ed., 1998, pp.111.
- [19] M. Moghimi and H. Pourghassem, "Shadow detection based on combinations of HSV color space and orthogonal transformation in surveillance videos", *Iranian Conference on Intelligent Systems (ICIS)*, vol.1, n° 1, pp.1,6, Feb. 2014.
- [20] M. Zanuy, *Tratamiento digital de voz e imagen y aplicación a la multimedia*, Marcombo, 2000, p. 288.
- [21] A. Pardo and J. Díaz, *Fundamentos en sistemas de control automático*, Universidad de Pamplona, 2004, p.155.
- [22] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van, "Surf: Speeded up robust features", in *Computer Vision- ECCV 2006*. Springer, 2006, pp. 404-417.
- [23] Hesheng Wang, Yun-Hui Liu, and Weidong Chen, "Uncalibrated Visual Tracking Control Without Visual Velocity", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.18, n°6, pp.1359,1370, Nov. 2010
- [24] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. I. Basic approaches", *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol.13, n°4, p. 82,90, Dec. 2006.
- [25] E. Martínez, C. Peña y P. Cárdenas, "Optimización dimensional de un robot paralelo tipo delta basado en el menor consumo de energía" *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol.1, n° 21, pp. 73 - 88, 2011.