

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBÓTICO MEDIANTE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Basantes Ortiz Juan Carlos
ABB ECUADOR S.A., Ulloa N31-264 y Av. Mariana de Jesús

Torres Tufiño Freddy Ricardo
PETROCOMERCIAL, Panamericana Sur Km 10 ½ El Beaterio

RESUMEN

El presente Proyecto: "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BRAZO ROBÓTICO MEDIANTE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES", consiste en la implementación de un sistema que realiza la adquisición y procesamiento de una imagen obtenida a través de una cámara digital, posteriormente identifica entre un grupo de figuras geométricas la opción definida por el usuario (cuadrados, círculos o triángulos) localizadas en una plataforma A, para luego trasladarlas a una plataforma B, mediante el posicionamiento adecuado de un brazo robótico de cinco grados de libertad. Se ha desarrollado en dos etapas claramente definidas, la de Procesamiento de Imagen y la de Desarrollo e Implementación del Manipulador Robótico.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGEN

La información consta de incontables elementos, figuras, sonidos, voces, imágenes visuales e imágenes audio-visuales. Toda esta información se guardará y transferirá a través de una tecnología que combina productos multimedia y técnicas de digitalización.

Los seres humanos confían fundamentalmente en el sentido de la vista. Recogemos 99 % de nuestra información a través de nuestros ojos. El procesamiento de imágenes es un proceso que concierne tanto a ordenadores como a algoritmos diversos para un propósito específico, una vez que se han adquirido las imágenes de interés a través de una cámara y/o un escáner ^[1].

Los procesos de reconocimiento de patrones, y en particular los que utilizan señales provenientes del mundo real comprenden algunas etapas básicas ^{[2], [3]}.

a) *Adquisición de Datos (señales temporales, imágenes estáticas o una secuencia de*

imágenes) empleando dispositivos adecuados: Usualmente en esta etapa se emplean instrumentos de medición, sistemas computarizados de adquisición y almacenamiento de información.

b) *Procesamiento previo o procesamiento de datos:* etapa que permite a menudo un cambio en el espacio de representación de la señal, adaptándola para la etapa posterior (segmentación de las imágenes, normalización).

c) *Extracción de características relevantes:* en esta etapa los métodos que usualmente se aplican pueden agruparse en: no transformados (momentos, modelos paramétricos), y transformados (Transformada de Hough, Transformada de Fourier); elementos de la geometría, y descriptores gráficos.

d) *Selección de características:* es el paso en el que se optimiza en número las características extraídas en el paso anterior, sin que el patrón pierda los rasgos que ayuden a su posterior identificación.

e) *Clasificación:* es la identificación de un objeto como miembro de una clase, cuyos componentes se han agrupado en función de similitud.

En el presente trabajo se proponen aportes para la caracterización de información de tipo 2-D (imágenes estáticas) con técnicas de diversos campos (Transformadas, geometría, procesamiento digital de imágenes).

ADQUISICION DE DATOS

Para la adquisición de la imagen se utilizó el paquete computacional MatLab 7.0 ya que este ofrece una serie de funciones sumamente útiles en el proceso de adquisición y procesamiento de imagen.

Para la adquisición de la imagen despliega una secuencia de video en vivo (preview) dentro del

MatLab, la cual muestra los objetos ubicados en la plataforma de inicio A, a continuación se captura una de las tramas la cual servirá como fuente para el procesamiento de imagen.

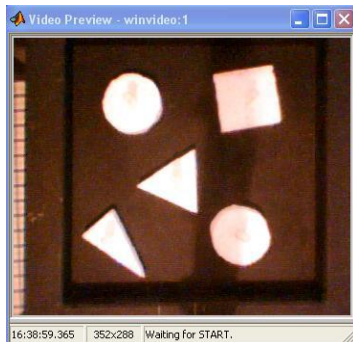


Figura 1 Imagen Adquirida por la Cámara

Este proceso se realiza cada vez que el manipulador robótico realiza una acción, de tal manera que se obtiene la ubicación actual de los elementos. Luego de ser capturada la imagen, se cierra la pantalla donde se encuentra la secuencia de video (preview), para luego comenzar con la etapa de análisis de la imagen.

PREPROCESAMIENTO

El interés en el procesamiento digital de imágenes se basa esencialmente en dos aspectos, mejorar la información contenida en una imagen para la interpretación humana y en el tratamiento de los datos de una escena para la percepción autónoma por una máquina.

Escala de Grises: Como fase previa a la etapa de procesamiento se cambia el campo de acción de la imagen capturada, la imagen captada por la cámara es del tipo RGB es decir que una imagen a color se transforma en una imagen binaria. La forma más común de generar imágenes binarias es mediante la utilización del valor umbral de una imagen a escala de grises; es decir se elige un valor límite (o bien un intervalo) a partir del cual todos los valores de intensidades mayores serán codificados como 1 mientras que los que estén por debajo serán codificados a cero. Para dicha transformación se utiliza la función *rgb2gray*, la cual como fuente tiene la imagen capturada y retorna una imagen en escala de grises.

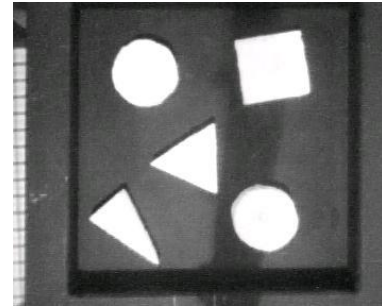


Figura 2 Imagen en Escala de Grises

Binarización: En visión computacional el trabajo con imágenes binarias es muy importante ya sea para realizar segmentación por intensidad de la imagen, para generar algoritmos de reconstrucción o reconocer estructuras. Una imagen binaria es una imagen en la cual cada píxel puede tener solo uno de dos valores posibles 1 o 0. Como es lógico suponer una imagen en esas condiciones es mucho más fácil encontrar y distinguir sus características estructurales. La forma más común de generar imágenes binarias es mediante la utilización del valor umbral de una imagen a escala de grises; es decir se elige un valor límite (o bien un intervalo) a partir del cual todos los valores de intensidades mayores serán codificados como 1 mientras que los que estén por debajo serán codificados a cero. Además por medio de la binarización se consigue eliminar el efecto del brillo en la imagen y prepararla para la etapa de procesamiento y extracción de características. Para esto se utiliza la función *im2bw* que cambia la imagen en escala de grises a una imagen binaria.

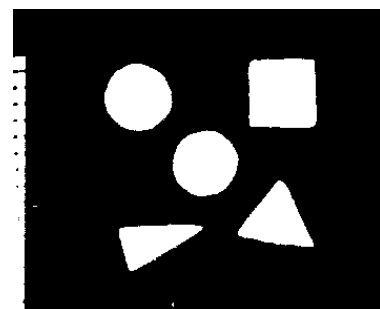


Figura 3 Imagen Binaria

En la imagen binaria obtenida se puede observar figuras en la frontera de la misma debido al hecho de que una porción de la imagen obtenida, representa un espacio que se encuentra fuera de la plataforma de trabajo estos objetos se eliminan, además se evita que cualquier objeto incompleto que se ubique en los límites de la imagen pueda interferir o agregar un error al momento de realizar el proceso.

En la figura 3 se pueden observar espacios pequeños extraños que no son parte de los atributos de la figura y que aparecen debido a efectos de iluminación y al hecho de que la cámara ubicada en una posición de 90° con respecto a la superficie de trabajo introduce objetos no deseados dentro de la imagen. Para eliminar estos objetos extraños que en el momento de realizar el etiquetado de la imagen introducen regiones que no son de interés dentro del proceso, se eliminan todos los objetos dentro de la imagen que posean un número menor a 30 píxeles. Utilizando la herramienta *bwareaopen* la cual nos permite eliminar todos los componentes conectados que contengan un número menor que Q píxeles, en este caso el valor de Q es 30.

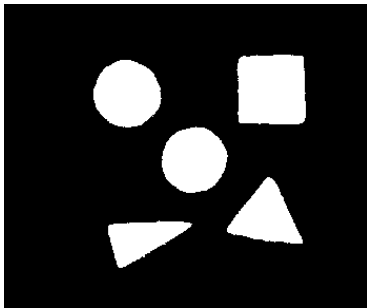


Figura 4 Imagen Sin Objetos con en la Frontera

Filtro Morfológico: A pesar de que para el ojo humano cada una de las regiones dentro de la imagen se encuentran completas en ocasiones las mismas presentan discontinuidades que provocan espacios separados o vacíos dentro de una misma imagen, por lo cual es recomendable realizar un filtro morfológico utilizando las funciones *imfill* e *imclose* incluidas en el Toolbox de imagen del MatLab.

Para finalizar la etapa de pre-procesamiento se realiza la reconstrucción de la imagen utilizando varias operaciones morfológicas como *imreconstruct*, *imopen*, *imerode*, *imdilate*.

Dilatación y Erosión: La dilatación se basa en aumentar el nivel de los valores de los píxeles en el entorno de los objetos presentes en la imagen. La erosión se basa en reducir el nivel de los píxeles del entorno de un objeto. El número de píxeles a los que se aumenta o reduce el nivel depende del tamaño y forma del elemento estructural usado para procesar la imagen. La dilatación y la erosión “expande” y “contrae” respectivamente la imagen.

Para calcular la dilatación se superpone el píxel central del elemento estructural a cada píxel de la imagen de entrada, entonces el píxel de la imagen de entrada se altera en función de los

valores de los píxeles del entorno, definidos por el elemento estructural. El valor del píxel de salida será el máximo entre todos los píxeles presentes en la vecindad.



Figura 5 a) Imagen de Fondo b) Imagen sin Ruido

Para eliminar el efecto de concavidad de la cámara se realiza una resta de imágenes en la primera tenemos el fondo, la segunda representa la imagen original como resultado se obtiene una imagen sin el efecto de la concavidad de la cámara.

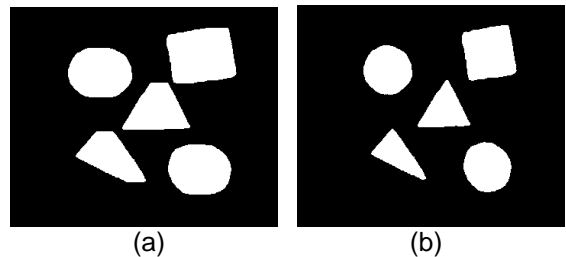


Figura 6 a) Imagen Dilatada b) Imagen Procesada

Se somete a la imagen a la operación morfológica dilatación para eliminar cualquier reflexión horizontal presente en la imagen y luego utilizamos la función *imreconstruct* y se obtiene la imagen de mejor calidad para la extracción de atributos.

EXTRACCION DE CARACTERISTICAS

Con el objetivo de encontrar el número de regiones presentes dentro de la imagen, se somete a la imagen a un proceso de etiquetado, cada una de las regiones es representada mediante un color distinto como muestra la Figura 7.

El Fondo, corresponde a las regiones de la imagen que no interesan. Se les suele asignar la etiqueta 0, y se representan con un nivel cero en la capa de segmentación. El Primer Plano, que determina los píxeles de la imagen que corresponden a objetos de interés. Etiqueta, que es el número que identifica a cada píxel, indicando a qué objeto pertenece.

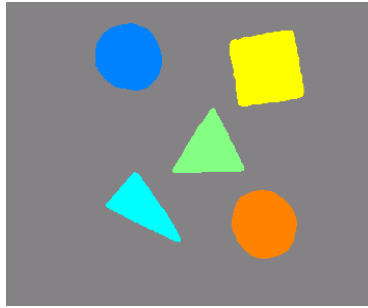


Figura 7 Imagen Etiquetada

La imagen muestra claramente 6 regiones, etiquetadas cada una de ellas por medio de un diferente color, el fondo de color plomo y cada una de las figuras por los colores amarillo, azul, verde, naranja y turquesa. Ya que se dispone del número de regiones se calcula las coordenadas de los centroides de cada una de las regiones encontradas, los mismos que una vez realizada la etapa de procesamiento de imagen serán enviados para el posicionamiento del brazo robótico.

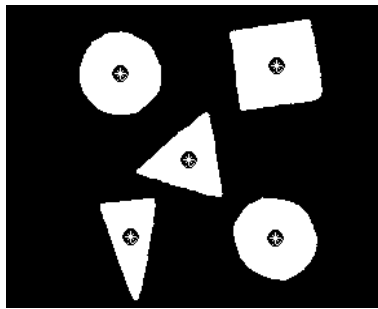


Figura 8 Imagen Binaria y Obtención de Centroides

SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Ahora se procede a separar cada una de las regiones y visualizarlas independientemente para iniciar la etapa de extracción de características. Finalizado la separación de cada una de las regiones extraemos los bordes de las mismas. Para acentuar los bordes sometemos a cada una de las regiones a una dilatación con esto podemos visualizar mejor todas las características de las figuras.

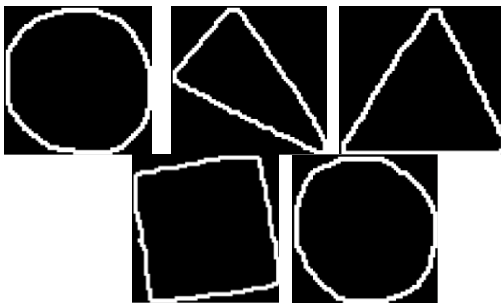


Figura 8.1 Imagen Dilatada

CLASIFICACION

Una vez obtenidas las regiones con la dilatación de los bordes se procede a someter cada una de las regiones a la Transformada de Hough (TH). Aplicando la TH se convierte la representación $[x,y]$ a $[\rho,\theta]$. Utilizando la ecuación paramétrica de la recta.

$$x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \text{sen}(\theta) = \rho \quad \text{Ec. 1}$$

La TH es independiente de la posición de cada una de las figuras, es decir, se puede identificar la cantidad de picos de la transformada sin importar si la figura se encuentra rotada con respecto al eje de proyección del campo de la plataforma.

Clasificación Triángulos

Las figura 9 muestran la TH del triángulo presente en la imagen. En la misma se puede visualizar que existes tres puntos en donde se interceptan las curvas sinusoidales, lo cual indica la presencia de tres líneas las mismas que conforman el perímetro del triángulo. Para determinar los valores donde se interceptan las curvas sinusoidales

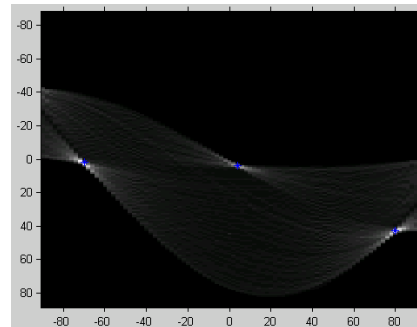


Figura 10 TH del Triángulo y Extracción de Picos

Dentro de la etapa de clasificación se envían a la etapa de posicionamiento del brazo robótico las siguientes variables: el número de objetos presentes en la imagen adquirida por la cámara digital, las coordenadas de los centroides de las regiones correspondientes a la opción del usuario, y por último la cantidad de figuras encontradas. En el caso de la selección de triángulos y para este ejemplo tenemos que el número de regiones es cinco, las coordenadas de los centroides y el número total de triángulos encontrados es dos.

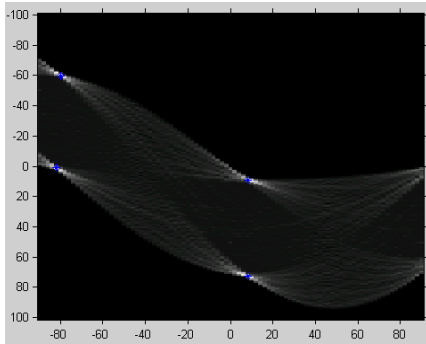


Figura 11 TH un Cuadrado y Extracción de Picos

En caso de que la selección del usuario sea la de cuadrados se realiza un proceso análogo pero en este caso se buscan cuatro picos dentro de la TH, cada pico representa el número de lados de la región analizada. La Figura 11 muestra la TH de un cuadrado y la extracción de los picos dentro de la transformada.

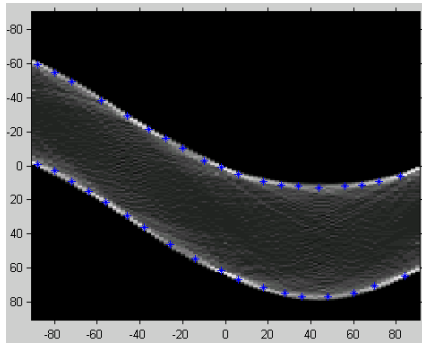


Figura 12 TH del Círculo y Extracción de Picos

Finalmente, para la selección de círculos se obtiene que el número de picos es bastante alto, debido a que al círculo se le considera como una figura geométrica con un infinito número de lados, mientras mayor sea el número de picos encontrados se acerca en un mayor grado a un círculo perfecto.

DESARROLLO DEL MANIPULADOR CON VISIÓN ROBOTICA

Para la construcción de este modelo, se inicia con el diseño y la implementación de la estructura mecánica de la planta completa y luego de establecido el modelo de su sistema cinemático (mediante parámetros Denavit-Hartenberg), se definen los algoritmos de control por software del brazo robótico para la realización de la tarea, objeto de este trabajo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se escogen las siguientes características generales para el brazo robótico:

Tipo de robot: Antropomórfico
 Grados de libertad: Cinco
 Clasificación: Robot industrial / trayectoria operada-continua
 Morfología: Configuración Angular
 Articulación: Rotacional
 Elemento terminal: Dedos deslizantes.

El modelo consta de una base con giro angular, tres articulaciones angulares y una articulación angular en el elemento terminal (pinza). La construcción se realiza mediante el empleo de servomotores de modelismo para el movimiento angular de las articulaciones y debido a que se requiere un material liviano para la estructura de soporte, se utiliza acrílico de 2 mm de espesor.

La estructura, además del brazo robótico propiamente dicho, debe contar con un soporte para la cámara de captura de imágenes y las plataformas que deben contener las figuras geométricas que serán identificadas, localizadas y trasladadas de un sitio a otro. La planta de esta estructura debe ser lo suficientemente robusta para soportar las tareas repetitivas que se darán del proceso, por lo que se utilizan perfiles de hierro.

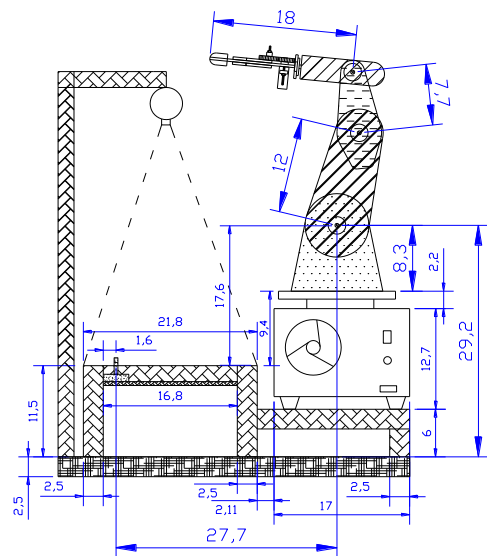


Figura 13 Dibujo de Estructura, Vista Lateral

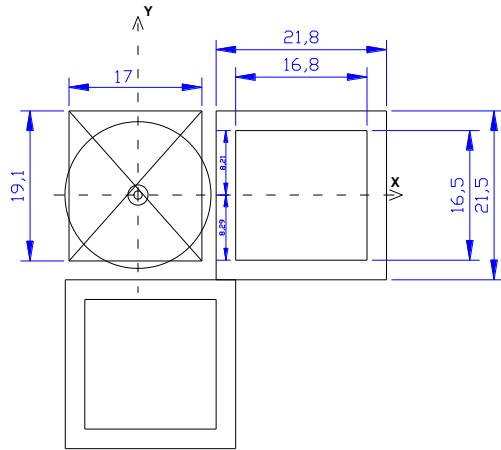


Figura 14 Dibujo de Estructura, Vista de Arriba

DESARROLLO CINEMÁTICO DEL BRAZO ROBÓTICO

El objetivo de esta parte del presente proyecto es desarrollar un sistema computacional que permita el control automático de la posición del elemento terminal del brazo robótico, dada por la localización espacial de una figura geométrica, la cual es determinada por el procesamiento de la imagen capturada por medio de una cámara web. Mediante el procesamiento de la imagen se logra identificar la posición del centroide de la figura identificada en un plano X-Y, obteniéndose de esta forma la localización de la posición final deseada del elemento terminal para el brazo robótico. El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial, por lo tanto al requerirse un sistema de control automático para los servomotores de las articulaciones del robot, en esta sección del proyecto se utilizan las representaciones cinemáticas utilizadas en robótica para la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg, para consecuentemente llegar a deducir las ecuaciones cinemáticas inversas correspondientes a cada articulación; desarrollando un algoritmo computacional con dichas ecuaciones, el sistema posee la capacidad para auto-configurar los ángulos de posición de las articulaciones del brazo robótico y colocar el elemento terminal sobre el centro de una pieza geométrica a ser localizada, en cualquier posición al azar en la que ésta se encuentre.

Parámetros de DENAVIT-HARTENBERG [4] para el brazo robótico: Tomando en cuenta que las posiciones finales de las articulaciones

del brazo robótico, matemáticamente responden a una serie de operaciones matriciales de traslación y rotación de sus respectivos sistemas de coordenadas, se puede resolver el problema cinemático inverso de una manera más simple al reducir el número de incógnitas (ángulos de posición de los ejes rotacionales) con la traslación del origen del sistema de coordenadas X_0, Y_0, Z_0 hasta la intersección con el origen del sistema X_1, Y_1, Z_1 ; realizando las respectivas operaciones se obtiene, utilizando la matriz homogénea de equivalencia simbólica, la determinación del ángulo de posición rotacional " θ " (giro de la "base") en función de las coordenadas en X-Y de la localización de una pieza geométrica a través del programa de captura y procesamiento de imágenes. Para la determinación de los parámetros correspondientes, se elige una posición inicial de referencia para el brazo robótico, de preferencia se utilizan los ángulos rectos para facilitar los cálculos al momento de usar las funciones trigonométricas

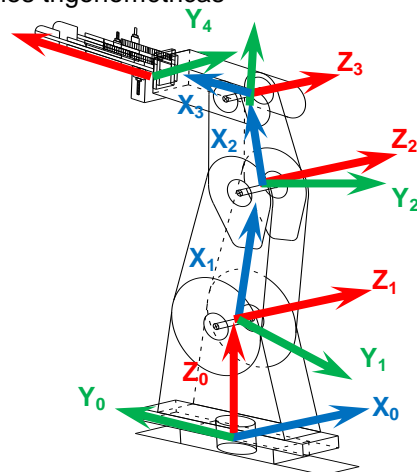


Figura 14 Ejes de Referencia

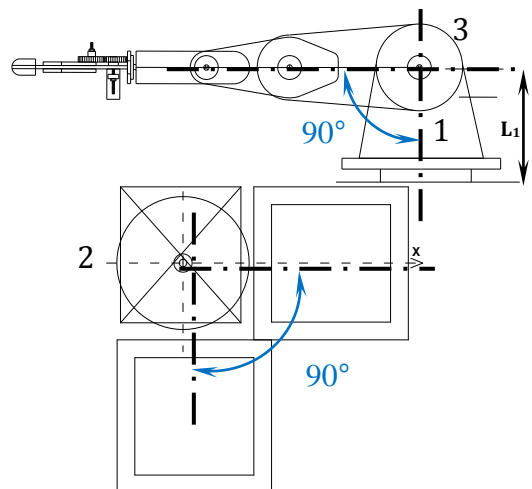


Figura 15 Parámetros de Traslación de Sistemas de Coordenadas

	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	0	0	0	0
2	0	0	$\pi/2$	0
3	$\pi/2$	0	0	L_1

Tabla 1 Parámetros para la Traslación del Sistema de Referencia

ARTICULACIÓN	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	α_1	L_1	90°	L_1
2	α_2	L_2	0	0
3	α_3	L_3	0	0
4	α_4	L_4	0	0
5	α_5	L_5	0	0

Tabla 2 Parámetros Denavith-Hartenberg

Con la información de posición en el plano X-Y en centímetros, se aplican las ecuaciones cinemáticas inversas.

Ecuación 5.1.4.13 para el ángulo No.4 ("base"):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{C_y}{C_x}$$

Ecuación 5.1.4.54 para el ángulo No.1 ("hombro"):

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{a_2 \sin \alpha_2}{a_1 + a_2 \cos \alpha_2} \right)$$

Ecuación 5.1.4.42 para el ángulo No.2 ("codo"):

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{A^2 + B^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right)$$

Ecuación 5.1.4.59 para el ángulo No.3 ("muñeca"):

$$\alpha_3 = \tan^{-1} \left(\frac{C_z}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{a_2 \sin \alpha_2}{a_1 + a_2 \cos \alpha_2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha_2}}{\cos \alpha_2} \right)$$

Donde:

$$A = C_x^2 + C_y^2 - a_3 \frac{C_x^2 + C_y^2}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}}$$

$$B = C_z - a_3 \frac{C_z}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}}$$

C_x = coordenada en x (cm)

C_z = coordenada en z (cm) = -17,6 cm (valor fijo de la planta)

a_1 = valor del eslabón No.1 = 12 cm (valor fijo de la planta)

a_2 = valor del eslabón No.3 = 7,7 cm (valor fijo de la planta)

a_3 = valor del eslabón No.3 = 18 cm (valor fijo de la planta)



Figura 16 Planta Completa Construida

Etapas de Posicionamiento: Esta etapa del programa toma las variables generadas de los ángulos de cada una de las articulaciones del brazo robótico y los ordena en una secuencia para que el posicionamiento de los elementos del robot sea el adecuado y posteriormente se coloque cada una de las figuras en un orden preestablecido y organizadas de acuerdo a su forma.

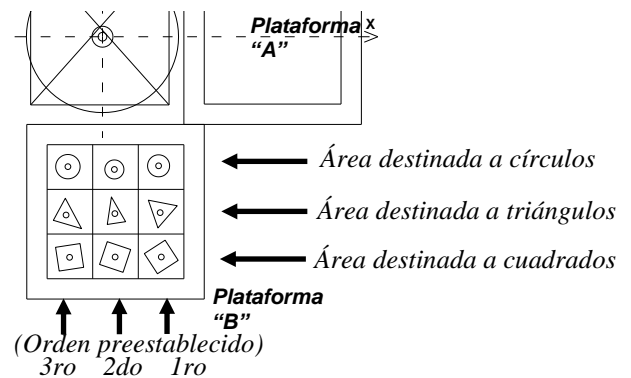


Figura 17 Orden de Figuras de Acuerdo a Forma

Se han previsto dos tipos de control: manual y automático, a su vez en el modo de control automático se cuenta con la modalidad semiautomática y automática.

En el modo de control manual, existen seis controles deslizantes, uno para cada una de las articulaciones del brazo robótico, incluyendo el comando para abrir y cerrar la pinza del elemento terminal.

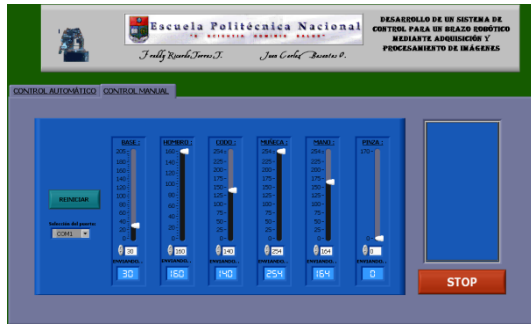


Figura 18 HMI Implementado en Control Manual
Con estos controles se envía una señal en secuencia ascendente o descendente en pasos de uno hacia el puerto serial, de manera que se controlen las señales PWM de los respectivos servomotores en el robot.

Para el control automático se han implementado dos modalidades: la primera con el nombre de "Semi-Automático" para demostrar la secuencia de operación del programa y la segunda "Automático" para una mínima intervención del usuario.



Figura 19 HMI Implementado en Control Semi-Automático

En el modo "Semi-Automático" la HMI presenta un panel del control con los botones de control necesarios para controlar la secuencia de etapas de operación una a la vez y permitir realizar al usuario una exposición y un análisis de la metodología utilizada para la implementación del sistema integrado cámara-robot.

En el modo "Automático", el usuario selecciona el tipo de figura que se desee sólo pulsando el botón correspondiente en la sección "Selección de Figuras".

La adecuada secuencia de datos se genera mediante una sub-etapa del programa, la cual tiene preestablecido el movimiento inicial del brazo hasta colocarlo en una posición cercana a la plataforma de las piezas geométricas, para luego tomar los datos generados de las posiciones angulares que hacen posible la

colocación del elemento terminal encima del centro de la figura seleccionada y detectada, hecho esto el programa sigue una secuencia de movimiento del brazo hasta la plataforma "B" y, mediante una serie de parámetros de posicionamiento definidos previamente, coloca las piezas en orden de acuerdo a su respectiva forma. Terminada esta acción, si se encuentra en modo "Semi-Automático", el usuario debe seleccionar otra figura o reiniciar la secuencia; si está en modo "Automático", el sistema verificará la existencia de más piezas de la figura seleccionada y procederá a tomar la siguiente figura o, si ya no se detectan más, volverá a colocar el brazo robótico en su posición inicial de reposo.

La secuencia de operación es la siguiente:

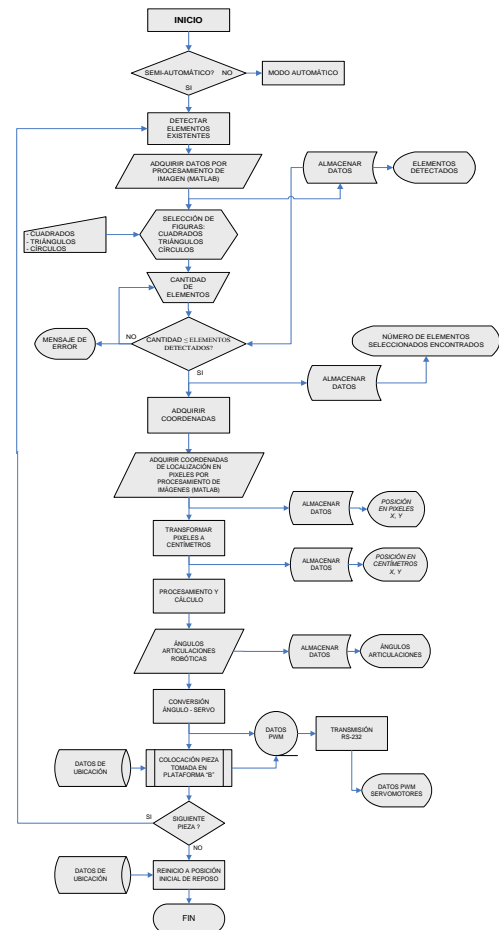


Figura 20 Diagrama de Flujo del Sistema de Control por Software

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado satisfactoriamente una aplicación que permite distinguir dentro de un grupo de figuras localizadas en una plataforma A, que corresponden a figuras geométricas

- regulares tales como círculos cuadrados y triángulos, para luego transportarlas de una manera ordenada hacia una plataforma B, con la ayuda de un adecuado posicionamiento de las articulaciones del brazo robótico.
- Se ha logrado vincular los resultados del proceso de adquisición de imagen (centroides de las figuras identificadas), con el sistema de posicionamiento del brazo robótico de acuerdo al objetivo propuesto. La aplicación enlaza dos sistemas de desarrollo computacional avanzados como son el MatLab y el LabView los cuales, durante la ejecución del software, no muestran incompatibilidad ni retardos en el proceso computacional del equipo utilizado (Laptop GATEWAY MA3; 1.8 GHz, RAM 1Gb, S.O. Windows XP).
 - El sistema de visión implementado es capaz de incorporar nuevas tareas o adaptarse a cambios utilizando los medios existentes (por ejemplo distinción imágenes por colores), sin requerir demasiado trabajo por parte del programador. El presente trabajo permitiría encontrar figuras de mayor número de lados, añadiendo lazos en el cálculo del número de picos en la Transformada de Hough.
 - Las cámaras web son herramientas de entrada para la adquisición de imagen y actualmente sus costos son relativamente económicos. Por lo tanto la introducción de un sistema de visión artificial, en aplicaciones basadas en computadoras es un objetivo factible de implementar. La interfaz desarrollada usa la visión artificial como canal de comunicación desde el usuario a la computadora. Se debe recordar que ninguna imagen proveniente de una cámara digital puede ser utilizada directamente, ésta debe ser sometida a un proceso de mejoramiento de calidad para su interpretación y extracción de características.
 - En un sistema de visión artificial no existe un modelo óptimo o general para todas las aplicaciones. Cada aplicación deberá determinar las técnicas adecuadas para una extracción eficiente de los atributos requeridos.
 - Un algoritmo adecuado para la detección de líneas y curvas basado en la transformada de Hough fue propuesto en el software de este proyecto. Como se puede ver, la expresión de superficie-plano $\rho-\theta$ de la imagen no solamente es una técnica eficaz para la detección de líneas rectas, también puede ser generalizado a curvas de mayor grado.
 - Con los resultados que se obtuvieron en la aplicación de la transformada de Hough, se puede concluir que su efectividad es bastante buena, sin embargo, el tiempo de procesamiento está en función del número de puntos que tengan los bordes, por ello el contraste y una buena detección de bordes en la imagen son deseables para aplicar la transformada de Hough.
 - El tiempo que le toma al método encontrar cada una de las figuras en la secuencia de imágenes es muy corto y depende de la velocidad de proceso del computador utilizado. Por eso se ve que su aplicación inmediata podría darse en la industria, para el control de robots seleccionadores o aparatos semejantes. Cabe anotar que en el presente proyecto se introdujeron retardos de 3 segundos en cada una de las etapas del procesamiento y su correspondiente visualización gráfica, para permitir apreciar el proceso completo propiamente dicho, por lo que se podría interpretar erróneamente que el sistema es lento.
 - Se ha evaluado el funcionamiento del sistema con diferentes posiciones de las figuras ubicadas en la plataforma, éste responde satisfactoriamente en la mayoría de casos, sin embargo se manifiestan errores de posicionamiento debido a factores mecánicos y de software. Los principales factores que inciden en el error de posicionamiento del elemento terminal del brazo robótico sobre el centro de la pieza geométrica son: su estructura mecánica, la precisión de los servomotores implementados y la precisión del cómputo iterativo del software de procesamiento de imágenes para localizar las coordenadas X-Y del centro de la figura.

- Tanto la tarjeta de control de servos como los servomotores seleccionados se utilizan en muchos modelos comerciales de robots didácticos, sin embargo la precisión con la que cuentan estos elementos no resultó ser muy confiable debido a que, según los datos del fabricante (ver Anexo 2), éstos poseen una capacidad de giro de 180 grados en el eje del servomotor y se posicionan en pasos de 0,72 grados con su respectiva señal PWM, pero en las pruebas realizadas, se comprobó que el rango de giro llegó desde unos 180 grados hasta más de 200 grados en algunos servos y, por lo tanto, se obtuvieron pasos desde 0,72 hasta 0,93 grados para su posicionamiento, lo que complicó la tarea de calibración.
- El hecho de que se debe controlar la posición de los servos con una señal PWM de 0 a 254 y por ende, en pasos discretos de 0,72 (ó 0,93) grados es el mayor limitante de precisión del sistema, ya que el algoritmo matemático que genera los ángulos de posición del brazo robótico es bastante preciso, pero al enviar este dato a los servomotores, se debe convertir el valor angular en un número entero equivalente PWM (0-254), por lo que se pierde exactitud.
- Otro factor influyente en el error de posicionamiento se presenta cuando se mantiene operando el robot en funcionamiento continuo por largos períodos de tiempo, debido al sobrecalentamiento de los servomotores, los que no están diseñados específicamente para este tipo de tareas en funcionamiento continuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Editor de Imágenes basado en Regiones. Aplicación en entorno MatLab. Autor: Samira Hervella Azouzi, I.T. Telecomunicaciones, esp, 2006, pp. 7-18. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3860/1/54960-1.pdf>
- [2] GONZÁLEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E.; Digital Image Processing, 2nd Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2002, pp 17-25.
- [3] PRATT, William K.; Digital Image Processing, 3th Edition. PixelSoft Inc. Los Altos, California. 2001, pp 3-32.
- [4] DOMINGO, Juan; Robótica, Apuntes para la Asignatura, Universidad de Valencia, España, 2001, pp.3.

BIOGRAFÍAS



Basantes Ortiz, Juan Carlos, Nació el 5 de noviembre de 1980. Obtuvo su Título de Bachiller en Humanidades Modernas, Especialización Físico Matemático en el Colegio Nacional Experimental "Juan Pío Montufar". Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional.

Actualmente se desempeña como Especialista de Proyectos en ABB ECUADOR S.A., división Service.



Torres Tufiño Freddy Ricardo, Nació el 24 de julio de 1976. Obtuvo su Título de Bachiller Técnico Industrial, Especialización Electrónica en el Colegio Nacional Técnico "Sucre". Sus estudios superiores los realizó en la Escuela

Politécnica Nacional.

Actualmente se desempeña como Supervisor de Inspección Técnica para Terminales y Depósitos de la Gerencia Regional Norte, PETROCOMERCIAL.