

# Control de un Robot Paralelo Tipo Delta basado en Manipulación en Espacio de Cámara Lineal

Enrique Coronado, Mauro Maya, Antonio Cárdenas, Marco García  
Facultad de Ingeniería - UASLP

Av. Dr. Manuel Nava No 8, Zona Universitaria. C.P. 78290 San Luis Potosí, SLP.  
{luis.coronado, mauro.maya, antonio.cardenas, marco.garcia}@uaslp.mx

**Resumen**—En este trabajo se presenta un método de control basado en visión de un robot paralelo tipo Delta. El control propuesto está basado en la estrategia de Manipulación en Espacio de Cámara Lineal (LCM-CSM, por sus siglas en inglés). Esta metodología de control es muy reciente y no ha sido aplicada al control de robots paralelos. El robot utilizado consta de tres grados de libertad (en translación). El control realizado es punto a punto. Los resultados experimentales muestran una precisión de 2mm en posicionamiento.

**Palabras clave:** Manipulación en Espacio de Cámara, Control de Robots por Visión, Robot Paralelo Tipo Delta.

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio de robots paralelos ha despertado gran interés en los últimos años. Esto se debe tanto a su creciente incursión en aplicaciones industriales y comerciales como al reto académico que representa el modelado y control de los mismos.

Una de las características distintivas de los manipuladores paralelos son las altas aceleraciones y velocidades permitidas en su desplazamiento. Lo anterior se debe en buena medida a la arquitectura de los robots que consta de dos o más cadenas cinemáticas en lazo cerrado lo cual permite distribuir entre ellas la carga de trabajo. Esta arquitectura le confiere una rigidez que se traduce en altas precisiones de posicionamiento ante una gran variedad de cargas. Además, en los manipuladores paralelos los actuadores están fijados a la base del robot de manera que es ésta quien carga con el peso de los motores. De esta manera, los actuadores solamente tienen que mover los eslabones y la carga de trabajo. Lo anterior permite que los eslabones sean esbeltos y ligeros resultando en baja pérdida de energía por el movimiento del propio manipulador. Otras características de los robots paralelos son su reducido espacio de trabajo y una mayor relación carga útil/masa total del robot, comparado con los robots tipo serial.

En particular, el robot paralelo tipo Delta, propuesto por R. Clavel en (Clavel, 1991), presenta una gran simplicidad de construcción, ligereza de estructura y puede desarrollar altas velocidades lo que le ha abierto paso en aplicaciones industriales. Una de las aplicaciones más populares es en la industria del empaquetado.

Flexibilidad y exactitud han sido entre otros, las características deseadas en sistemas basados en visión para el

control de robots. Entre las diferentes estrategias basadas en visión, el método de manipulación en espacio de cámara (CSM) ha demostrado su valía al implementarse exitosamente para controlar una amplia variedad de tareas de posicionamiento (Gonzalez-Galvan *et al.*, 2002).

El método CSM se basa en la estimación de la relación entre la posición de una serie de marcas visuales colocadas en el robot manipulador y su correspondiente posición en las imágenes tomadas por al menos dos cámaras. Esta relación está implícita en las denominadas ecuaciones de observación. El método CSM emplea el modelo cinemático nominal del manipulador y el modelo de cámara de orificio.

La metodología CSM no requiere la actualización en tiempo real de la información visual, este método realiza un control en lazo abierto basado en técnicas de estimación. El método CSM ha sido implementado con éxito en diversas áreas, incluyendo la exploración espacial (Baumgartner y Schenker, 1996), entornos de almacenamiento (Seelinger y Yoder, 2006; Seelinger *et al.*, 2002), tareas industriales (Fan, 2003) y robots móviles (Cárdenas *et al.*, 2003).

La técnica CSM emplea un modelo simplificado de cámara denominado modelo ortográfico (Skaar *et al.*, 1990). Este modelo es válido cuando las cámaras están colocadas a una distancia relativamente alejada del área de trabajo del robot donde el efecto de perspectiva sea mínimo. Los parámetros de visión acordes al modelo ortográfico son obtenidos mediante un proceso iterativo de estimación no lineal para un mínimo de dos cámaras participantes. Posteriormente, el CSM emplea una corrección de los datos acorde al modelo de cámara de orificio denominada corrección por *flattening* (Cárdenas *et al.*, 2003) para tomar en consideración el efecto de perspectiva. En años recientes se ha desarrollado una variante del CSM denominada LCM-CSM (Rendon-Mancha *et al.*, 2010). Esta técnica sustituye el modelo ortográfico por el modelo de cámara de orificio y elimina la necesidad de aplicar el proceso de *flattening*. Otra de las ventajas de esta metodología es que permite obtener los parámetros del modelo de cámara de forma directa mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales.

En este artículo se presenta una aplicación del método LCM-CSM para el control basado en visión de un robot paralelo tipo delta. El método LCM-CSM establece las ecuaciones de observación basadas en el modelo de cámara

de orificio y el modelo cinemático nominal del robot paralelo. El modelo de cámara de orificio es un modelo lineal bien establecido que consiste en una matriz de  $4 \times 3$  elementos (Hartley y Zisserman, 2004).

La modificación propuesta al método tradicional CSM presenta algunas ventajas. Primeramente, la matriz de proyección de cámara está representada por un modelo lineal. Esto permite una implementación más sencilla y un menor costo computacional. De manera adicional, teniendo un número suficiente de información, la linealidad del modelo asegura la obtención de una solución. Otra ventaja es que la estimación de los parámetros de visión se realiza en una sola etapa, en oposición a las dos etapas necesarias para el método tradicional de CSM. Finalmente, la metodología propuesta no requiere la medición manual de ningún parámetro.

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección II presenta una descripción general del robot paralelo tipo delta y su modelado cinemático. La sección III describe la metodología LCM-CSM. En la sección IV se presenta el hardware y software utilizado como plataforma de pruebas. En la sección V se muestran los resultados experimentales y finalmente la sección VI está enfocada en las conclusiones y el trabajo futuro.

## II. ROBOT PARALELO TIPO DELTA



Figura 1. Vista esquemática del robot tipo Delta

En esta sección se retoma una descripción breve del robot Delta. La estructura del robot Delta fue propuesta por R. Clavel en (Clavel, 1991). La fig. 1 muestra los componentes principales de un robot de este tipo, el cual consiste en tres cadenas cinemáticas (o piernas) de lazo cerrado. Las plataformas fija y móvil están marcadas con los números 1 y 2, respectivamente. El robot tiene tres grados de libertad. Los paralelogramos (3) aseguran la orientación constante entre la plataforma fija y la plataforma móvil, permitiendo únicamente movimientos de translación de esta última. El efector final se coloca en la plataforma móvil.

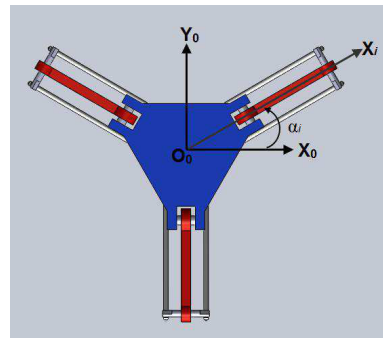


Figura 2. Vista superior esquemática de un robot tipo Delta

La fig. 2 muestra la vista superior esquemática de un robot paralelo tipo Delta.  $F_0 := (O_0, X_0, Y_0, Z_0)$  es un marco de referencia inercial del robot. A lo largo de esta sección el superíndice  $i = (1, 2, 3)$  se refiere a cada una de las tres piernas del robot. Los ángulos  $\alpha_i$ , medidos con respecto al eje  $X_0$ , son constantes e indican la distribución de las piernas del robot alrededor de  $Z_0$  ( $\alpha_i = \{30^\circ, 150^\circ, 270^\circ\}$ ).

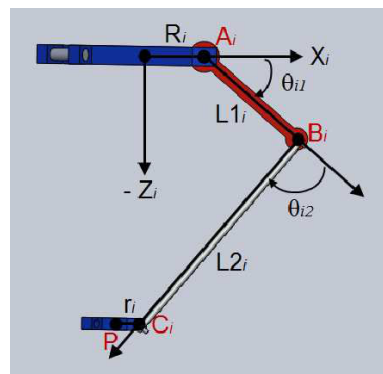


Figura 3. Vista lateral esquemática de un robot tipo Delta

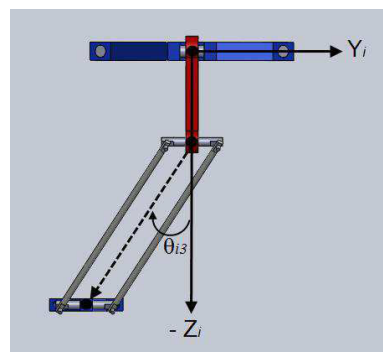


Figura 4. Vista frontal esquemática de un robot tipo Delta

En las figs. 3 y 4, se muestran las vistas lateral y frontal de una pierna del robot. En estas figuras,  $R_i = R$  es el radio de la plataforma fija,  $r_i = r$  es el radio de la

plataforma móvil,  $L1_i = L1$  es la longitud del eslabón actuado,  $L2_i = L2$  es la longitud del paralelogramo,  $\theta1_i$  es el ángulo actuado (asociado a la junta activa  $A_i$ ) mientras  $\theta_{i2}$  y  $\theta_{i3}$  son los ángulos pasivos (asociados a las juntas pasivas  $B_i$ ). Usando la notación anterior, a partir de las figs. 3 y 4 es claro que

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}_i + \mathbf{L1}_i + \mathbf{L2}_i + \mathbf{r}_i \quad (1)$$

o bien

$$\mathbf{p} - \mathbf{R}_i - \mathbf{L1}_i - \mathbf{r}_i = \mathbf{L2}_i \quad (2)$$

donde  $\mathbf{p}$  es el vector del centro de la plataforma fija ( $O_0$ ) al centro de la plataforma móvil (punto  $P$ )  $\mathbf{R}_i$  es el vector ( $O_0A_i$ ),  $\mathbf{L1}_i$  es el vector ( $A_iB_i$ ),  $\mathbf{L2}_i$  es el vector ( $B_iC_i$ ) y  $\mathbf{r}_i$  es el vector ( $C_iP$ ).

Desarrollando (2) en componentes (expresadas en el marco  $F_0$ ) y reacomodando términos podemos obtener

$$(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2 = L2^2 \quad (3)$$

donde  $X_p$ ,  $Y_p$  y  $Z_p$  son las coordenadas del vector  $\mathbf{p}$  y:

$$\begin{aligned} X_i &= (R - r + L1 \cos(\theta_{i1})) \cos(\alpha_i) \\ Y_i &= (R - r + L1 \cos(\theta_{i1})) \sin(\alpha_i) \\ Z_i &= -L1 \sin(\theta_{i1}) \end{aligned}$$

Las ecuaciones (3) corresponden a tres esferas de radio  $L2$  con centro en  $(X_i, Y_i, Z_i)$ . Los dos puntos de intersección de las tres esferas son las posibilidades de ubicación de la plataforma móvil. El modelo cinemático directo e inverso del Robot Delta se obtiene al resolver (3) para  $X_i, Y_i, Z_i$  y para  $\theta_{i1}$  respectivamente. Una solución explícita (analítica) puede ser obtenida (para mayores detalles del modelo cinemático ver por ejemplo (Maya *et al.*, 2013) y las referencias allí señaladas).

### III. PARÁMETROS DE VISIÓN DEL MÉTODO LCM-CSM

El método LCM-CSM funciona mediante el establecimiento y posterior optimización de un mapeo entre las proyecciones en el espacio de cámara de una serie de marcas visuales colocadas en el manipulador, y la configuración interna de las juntas del robot (Skaar *et al.*, 1987). Para relizar una correcta maniobra de posicionamiento del robot, es necesario obtener dicho mapeo para cada una de las cámaras utilizadas en el sistema de visión.

En el método LCM-CSM, dicho mapeo está representado por dos componentes. El primer componente está definido por el modelo de cámara de orificio (Horn, 1986). El segundo componente está conformado por el modelo cinemático nominal del robot manipulador. El primer mapeo está definido por un conjunto de “parámetros de visión” dados por  $\mathbf{p} = [p_{11}, p_{12} \dots p_{33}]^T$  y están representados por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_{ci} &= p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14} - x_{ci}p_{31}X_i \\ &\quad - x_{ci}p_{32}Y_i - x_{ci}p_{33}Z_i \\ y_{ci} &= p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24} - y_{ci}p_{31}X_i \\ &\quad - y_{ci}p_{32}Y_i - y_{ci}p_{33}Z_i \end{aligned} \quad (4)$$

donde las coordenadas  $(x_{ci}, y_{ci})$  representan la localización en espacio de cámara del centro de la  $i$ -ésima marca visual localizada en el efector final del robot. El vector de posición  $(X_i, Y_i, Z_i)$  describe la localización del centro de cada una de las marcas visuales en relación a un sistema coordenado fijo que corresponde con el modelo cinemático nominal del robot. Dicho vector de posición puede ser representado como  $(R_{X_i}(\Theta), R_{Y_i}(\Theta), R_{Z_i}(\Theta))$ . La configuración interna de las juntas del robot de  $n$  grados de libertad se denota mediante el vector  $\Theta = [\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n]^T$ . Por conveniencia, las ecuaciones (4) pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}_{ci} = \{\mathbf{h}(\mathbf{X}_i; \mathbf{p})\}$$

Los parámetros  $\mathbf{p}$  son estimados a través de la adquisición de un número  $m$  de correspondencias entre la ubicación de una marca visual con respecto al sistema coordenado del robot, y su proyección en el espacio de cámara, mediante la minimización del valor escalar  $J$  con respecto a los valores del vector  $\mathbf{p}$ :

$$\begin{aligned} J(\mathbf{p}) &= \\ &\sum_{k=1}^m \left[ \sum_{i=1}^{n(k)} [x_{c_{i,k}} - h_x(R_{X_i}(\Theta_k), R_{Y_i}(\Theta_k), R_{Z_i}(\Theta_k); \mathbf{p})]^2 \right. \\ &\quad \left. + [y_{c_{i,k}} - h_y(R_{X_i}(\Theta_k), R_{Y_i}(\Theta_k), R_{Z_i}(\Theta_k); \mathbf{p})]^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

donde los elementos  $(x_{c_{i,k}}, y_{c_{i,k}})$  representan las coordenadas en espacio de cámara de la  $i$ -ésima marca visual localizada en el efector final del robot en la posición  $k$ . Las coordenadas físicas de la  $i$ -ésima marca visual están representadas por  $(R_{X_i}, R_{Y_i}, R_{Z_i})$ , las cuales dependen de los valores de la configuración angular del manipulador contenidos en el vector  $\Theta$  y que están definidos mediante el modelo cinemático nominal del robot. Las funciones  $h_x, h_y$  corresponden a las expresiones que definen el modelo de cámara de orificio, mostradas en la ecuación (4);  $n$  es el número de cámaras utilizadas en el sistema de visión.

Por conveniencia, la ecuación (4) puede ser expresada como:

$$\begin{bmatrix} X_i & 0 \\ Y_i & 0 \\ Z_i & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & X_i \\ 0 & Y_i \\ 0 & Z_i \\ 0 & 1 \\ -x_{ci}X_i & -y_{ci}X_i \\ -x_{ci}Y_i & -y_{ci}Y_i \\ -x_{ci}Z_i & -y_{ci}Z_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13} \\ p_{14} \\ p_{21} \\ p_{22} \\ p_{23} \\ p_{24} \\ p_{31} \\ p_{32} \\ p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix}$$

Para calcular el vector  $\mathbf{p}$  se requieren al menos 6 correspondencias de puntos ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ). Si se utilizan más de 6 puntos para calcular  $\mathbf{p}$ , se obtiene un sistema sobredeterminado y se requiere un proceso de minimización para su solución. Un sistema sobredeterminado produce mejores resultados en la estimación del vector  $\mathbf{p}$ , ya que el proceso de minimización promedia los errores aleatorios presentes en los datos y estos se compensan al momento de calcular la estimación de los parámetros de visión. Para la aplicación presentada en este artículo, se obtiene una mejor estimación del modelo de cámara cuando se utiliza un mayor número de puntos y las marcas visuales se encuentran ubicadas en un área extendida del plano de imagen.

Para el cálculo de los parámetros de visión, se realiza una primera estimación utilizando las  $m$  muestras iniciales; posteriormente durante la maniobra de posicionamiento se realiza de manera iterativa una actualización de la información conforme el robot se va acercando al punto objetivo. En cada iteración se obtienen muestras de la posición en espacio de cámara del robot, a través de la detección de las marcas visuales. Con esa información y con las coordenadas físicas de dichas marcas, los parámetros de visión son actualizados y se calculan las coordenadas de las juntas del robot requeridas para posicionarse sobre el punto objetivo.

### III-A. Estimación del punto objetivo

La estimación de las coordenadas tridimensionales del punto objetivo se realiza a partir de las coordenadas en píxeles de dicho punto y los parámetros de visión actuales de las dos cámaras participantes. Este objetivo se logra a partir de la minimización del funcional:

$$F(X_i, Y_i, Z_i) = \sum_{j=1}^{nc} \left\{ \left[ x_{ci}^j - h_x(X_i, Y_i, Z_i; \mathbf{p}^j) \right]^2 + \left[ y_{ci}^j - h_y(X_i, Y_i, Z_i; \mathbf{p}^j) \right]^2 \right\} \quad (6)$$

Donde  $h_x, h_y$  son las funciones que representan el modelo de cámara de orificio,  $nc$  el número de cámaras participantes,  $x_{ci}^j, y_{ci}^j$  son las coordenadas en píxeles del punto objetivo en la  $j$ -ésima cámara,  $X_i, Y_i, Z_i$  representan las coordenadas tridimensionales del punto objetivo.

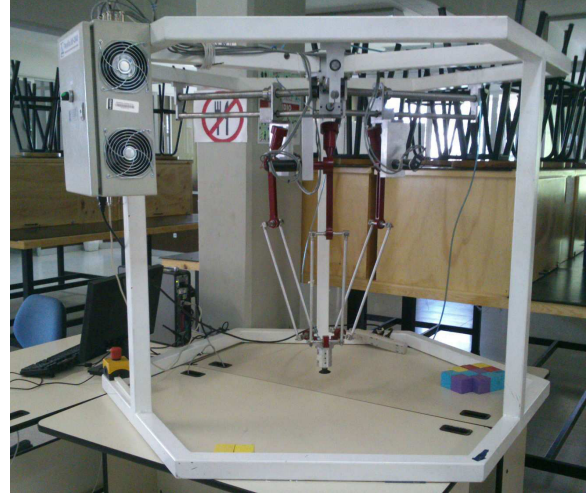


Figura 5. Robot a controlar.

## IV. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

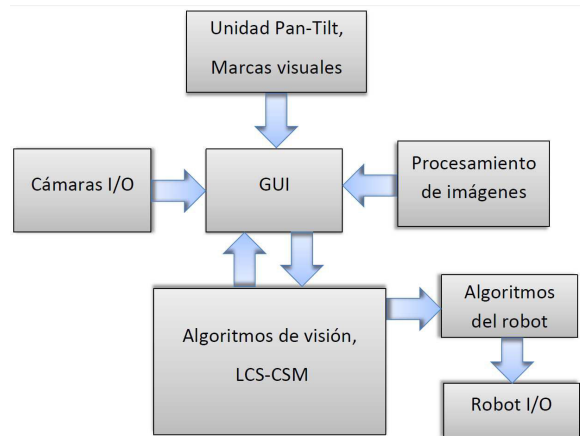


Figura 6. Diagrama del software de control del sistema de visión.

En esta sección se describe el proceso experimental utilizado para validar la estrategia propuesta en este artículo.

La sección IV-A describe la plataforma de hardware utilizada y la sección IV-B describe la implementación de software.

### IV-A. Hardware

Para la validación de las pruebas, se implementó un sistema de control basado en visión en un robot paralelo tipo delta de 3 grados de libertad. El sistema se compone de dos cámaras CCD montadas en tripiés, un robot delta parallax LFK-2040, y un controlador basado en una PC (Fig. 5). La PC ejecuta los algoritmos de control basado en visión, así como los algoritmos de control del robot. En las figs. 6 y 7 se muestra un diagrama de los componentes del sistema.

La morfología original del robot paralelo se ha mantenido. Únicamente se añadió al extremo del efector final

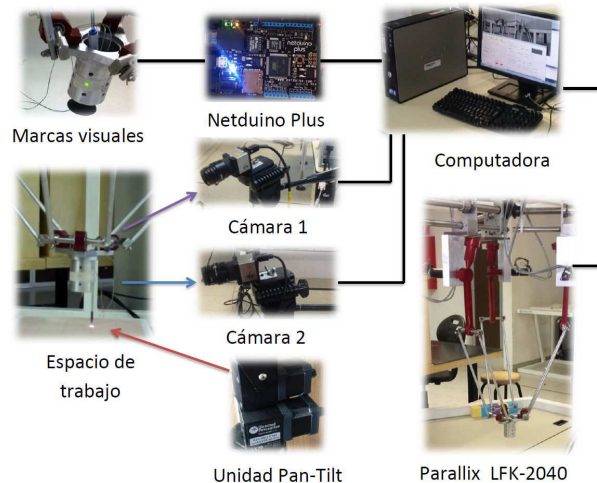


Figura 7. Componentes de la plataforma de control basado en visión.

una estructura cilíndrica que contiene una matriz de leds de  $6 \times 3$ . Este arreglo de leds se utiliza para localizar el efector del robot en las imágenes. Para el control implementado en la PC se utiliza una tarjeta controladora de movimiento PIC-SERVO SC. Las cámaras CCD utilizadas son de la marca uEye con una resolución de  $640 \times 480$  y sensor CCD  $1/3''$  modelo  $Ui - 1640 - C$  con unos lentes de  $12\text{ mm}$  modelo  $1639\text{ VCS}$ . El sistema operativo empleado fue Windows 7.

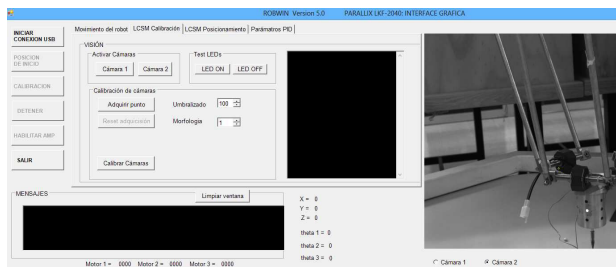


Figura 8. Interfaz gráfica de usuario.

#### IV-B. Software

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite realizar un control de supervisión de alto nivel sobre el sistema de manera remota. El sistema fue programado en lenguaje C++, OpenCV y GNU Scientific Library (GSL), utilizando el kit de desarrollo de software ROBWIN para el robot parallax LFK-2040. El objetivo de la GUI es permitir que el supervisor humano pueda identificar alguna característica de la superficie de interés como punto objetivo.

La GUI muestra una imagen en el monitor de la computadora, que permite al usuario ver el espacio de trabajo del robot y hacer clic con el mouse en la imagen mostrada. El usuario selecciona un punto de interés en la imagen y la GUI posiciona una marca en la pantalla para indicar el

punto seleccionado, (Fig. 8). El usuario puede “Aceptar” la selección o actualizar la pantalla.

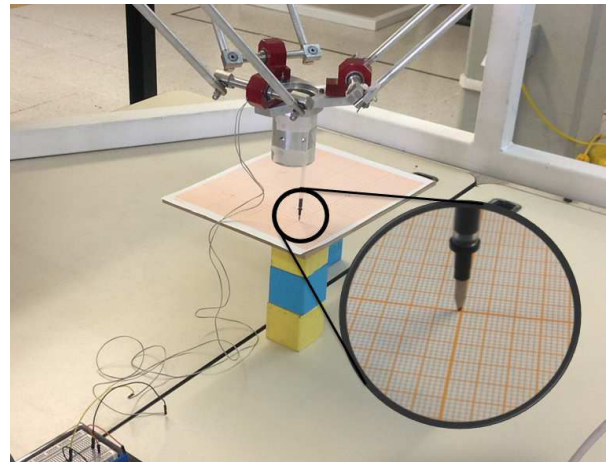


Figura 9. Error de posicionamiento del robot.

#### V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con la finalidad de evaluar experimentalmente el control propuesto, se realizó una serie de pruebas de posicionamiento punto a punto del robot.

Para la estimación inicial de los parámetros de visión se consideraron 9 correspondencias o muestras globales. Estas muestras se ubican en las esquinas y el centro de un prisma rectangular de  $200 \times 200 \times 160\text{ mm}$  con centro en  $C_0 = (0, 0, 580)\text{ mm}$  (dentro del espacio de trabajo del robot). Para cada experimento, se definió el error como la distancia euclidiana entre el punto objetivo seleccionado y el punto alcanzado por el robot. Dicho error fue medido físicamente para cada uno de los ejes cartesianos (Fig. 9). Las pruebas de posicionamiento tridimensional del efector final del robot se realizan desde la posición inicial (para estos experimentos se consideró siempre  $(0, 0, 400)\text{ mm}$ ) hasta puntos objetivo, en un espacio de  $250 \times 250 \times 150\text{ mm}$  con centro en  $C_0$ , definidos por el operador en la GUI. La adquisición de imágenes se realizó a 30 cps.

Un conjunto de 100 pruebas de posicionamiento fueron ejecutadas y documentadas. En 50 de estas pruebas se utilizaron únicamente muestras globales del espacio de trabajo, en las otras 50 pruebas se utilizaron muestras globales y locales. Los experimentos arrojan un error promedio de  $2,315\text{ mm}$  con una desviación estándar de  $0,877\text{ mm}$  utilizando únicamente muestras globales. Incorporando muestras locales el error promedio obtenido es de  $1,710\text{ mm}$  con una desviación estándar de  $0,686\text{ mm}$ .

La figura 10 muestra la desviación estándar para cada uno de los ejes ( $X, Y, Z$ ) para los dos esquemas realizados. En ellos se observa que se reduce el error en todos los ejes al incorporar muestras locales a las globales para actualizar los parámetros de visión conforme se acerca el efector final al punto objetivo.

Las figuras 11 y 12 muestran los valores promedio (línea divisoria de cada caja), mínimos y máximos (extremos de las líneas verticales) de los errores en cada eje así como del error global. Se puede observar que los valores se reducen al incorporar las muestras locales.

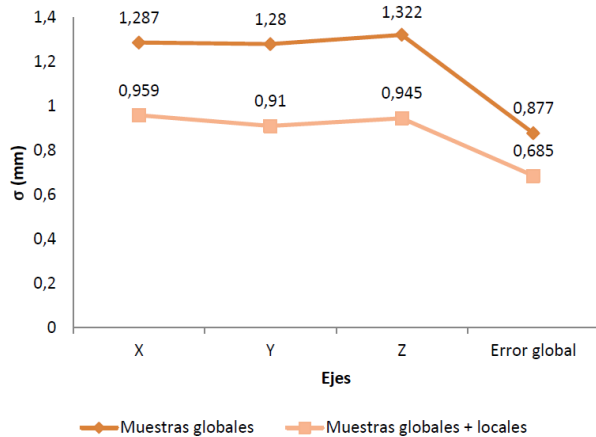


Figura 10. Desviación estándar de las muestras en cada eje.

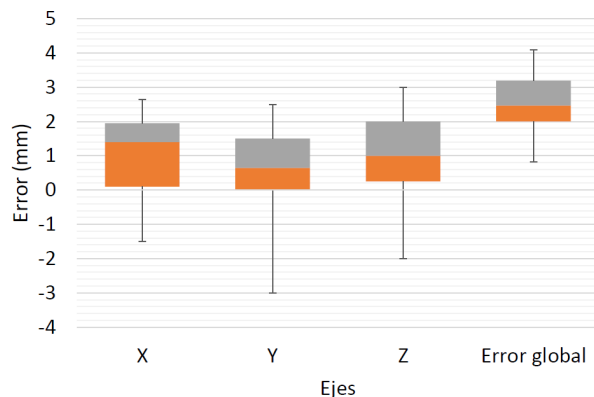


Figura 11. Diagrama de cajas tomando solo muestras globales.

## VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se propuso una nueva metodología de control basado en visión para un robot paralelo tipo delta. Esta metodología fue validada experimentalmente de manera exitosa obteniendo errores de posicionamiento del orden de 2 mm. Esta precisión de posicionamiento es del mismo orden que el obtenido con otras técnicas conocidas de control por visión para robótica. La precisión de posicionamiento mejora al incorporar información visual mientras se realiza la tarea. Una bondad de la técnica utilizada es el bajo costo computacional requerido.

En la continuación de este trabajo se prevee la realización de un estudio de sensibilidad de la precisión de posicionamiento con respecto a los parámetros del sistema controlado. Esto permitiría encontrar los parámetros más adecuados para mejorar la precisión del sistema.

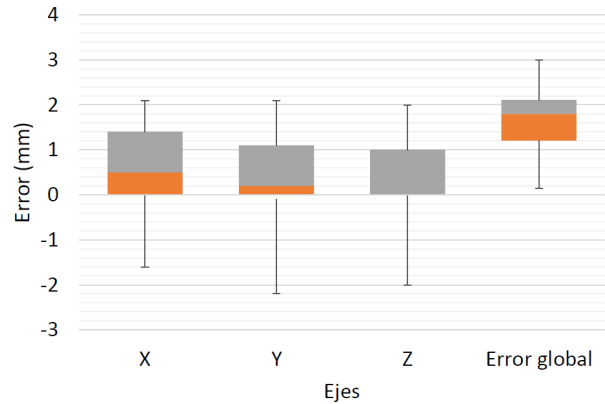


Figura 12. Diagrama de cajas tomando muestras locales y globales.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el CONACYT; el Fondo de Apoyo a la Investigación, UASLP (FAI) apoyo C10-FAI-05-35.62 y PROMEP apoyo CA 78 2012-2014 UASLP-CA-78

## REFERENCIAS

- Baumgartner, E. T. y P. S. Schenker (1996). Autonomous image-plane robot control for martian lander operations. En: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 726–731.
- Cárdenas, Antonio, Michael Seelinger, Bill Goodwine y Steven B. Skaar (2003). Vision-based control of a mobile base and on-board arm. *International Journal Robotics Research* 9(22), 677–698.
- Clavel, R. (1991). Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté. Tesis de doctorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausana, Suiza.
- Fan, Zhe (2003). Industrial applications of camera space manipulation with structured light. Tesis de doctorado. University of Notre Dame. Notre Dame, IN.
- Gonzalez-Galvan, Emilio J., Felipe Pazos, Steven Skaar y Antonio Cardenas-Galindo (2002). Camera pan/tilt to eliminate the workspace-size/pixel-resolution tradeoff with camera-space manipulation.. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 18(2), 95–104.
- Hartley, R. I. y A. Zisserman (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. second ed. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.
- Horn, B. (1986). *Robot Vision*. MIT Press. Cambridge.
- Maya, Mauro, Eduardo Castillo, Alberto Lomeli, Emilio González-Galván y Antonio Cárdenas (2013). Workspace and payload-capacity of a new reconfigurable delta parallel robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Rendon-Mancha, J.M., A. Cardenas, M.A. Garcia, E. Gonzalez-Galvan y B. Lara (2010). Robot positioning using camera-space manipulation with a linear camera model. *Robotics, IEEE Transactions on* 26(4), 726–733.
- Seelinger, Michael, John-David Yoder, Erick T. Baumgartner y Steven B. Skaar (2002). High precision visual control of mobile manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18(6), 957–965.
- Seelinger, Michael y John-David Yoder (2006). Automatic visual guidance of a forklift engaging a pallet. *Robotics and Autonomous Systems* 54(12), 1026–1038.
- Skaar, S. B., W. H. Brockman y R. Hanson (1987). Camera space manipulation. *International Journal of Robotics Research* 6(4), 20–32.
- Skaar, S. B., W. H. Brockman y W. S. Jang (1990). Three dimensional camera space manipulation. *International Journal of Robotics Research* 9(4), 22–39.