



Desarrollo del *Robot Paralelo* Parallix LKF-240

Eduardo Castillo Castañeda, Angel O. Vázquez Rodríguez,
Abraham González Hernández

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro,
Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, 76090-Querétaro, México. Tel: +52 (442) 229-0804, ext. 81013, email:
ecastilloca@ipn.mx

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo
Castillo, C.E, Vázquez, R.A.O, González, H. A (2012). Desarrollo del robot paralelo Parallax LKF-2040. Ingenio
Magno. Vol.3, pp. 48-57. Universidad Santo Tomás Tunja - CIIAM.

Recepción: 2011-08-08 | Aceptación: 2011-10-13

Resumen

En este trabajo se presenta al robot paralelo PARALLIX LKF-2040 desarrollado en la Instituto Politécnico Nacional y actualmente comercializado en Instituciones de Educación Superior para fortalecer la enseñanza de la mecatrónica. Este mecanismo posee una plataforma fija y otra móvil. Los actuadores están montados en la plataforma fija, reduciendo el cableado y manteniéndolo fuera del espacio de trabajo. La plataforma móvil es el elemento efector y puede ser posicionada en un amplio espacio de trabajo. La estructura del manipulador es ligera, simplificando la dinámica y minimizando el peso a desplazar. Lo anterior, permite utilizar el par generado por los motores sólo para el desplazamiento de la carga. El robot PARALLIX LKF-2040 tiene sus orígenes en la configuración del robot tipo Delta pero tiene articulaciones rotacionales en lugar de esféricas, proporcionando un espacio de trabajo más amplio. Primeramente, se presenta el concepto de robot paralelo y sus ventajas respecto a los robots convencionales tipo serial. Se muestra la estructura geométrica de un robot paralelo tipo 3RSS y se encuentra la solución de su cinemática inversa. También, se presentan los resultados obtenidos del análisis del espacio de trabajo y el diseño de una arquitectura de control de tres ejes para servomotores con encoder incremental en cuadratura. Además, se proponen técnicas novedosas basadas en análisis de imágenes para determinar la precisión y la repetibilidad del robot, así como la rigidez bajo diferentes condiciones de carga.

Palabras Clave: Robot paralelo, cinemática inversa, precisión, rigidez.

Abstract

This paper presents the parallel robot PARALLIX LKF-2040 developed at the National Polytechnic Institute and currently commercialized in Higher Education Institutions to strengthen the teaching of mechatronics. This mechanism has one fixed and one moving platform. The actuators are mounted on the fixed platform, reducing cabling and keeping it out of the workspace. The mobile platform is the end effector and can be positioned in a large workspace. The structure of the manipulator is light, simplifying its dynamics and minimizing the robot weight. This allows the use of the torque generated by the engines only in moving the load. The LKF-2040 PARALLIX robot has its origins in the Delta type robot configuration but it has rotational joints instead of spherical joints, providing a larger workspace. Firstly, this paper introduces the concept of parallel robot and its advantages over conventional serial type robots. This document also shows the geometrical structure of a parallel robot 3RSS type and the solution of its inverse kinematics. Also, we present the results obtained from the analysis of the workspace and the design of control architecture for three servo motors with incremental encoders. In addition, novel techniques are proposed based on image analysis to determine the accuracy and repeatability of the robot, and its stiffness under different loading conditions.

Keywords: Parallel robot, inverse kinematics, precision, stiffness.

1. ANTECEDENTES

La robótica industrial ha permitido que máquinas articuladas automatizadas sean utilizadas para realizar tareas complejas, peligrosas, repetitivas, o que requieran de elevada precisión. Sin embargo, el desarrollo de la robótica industrial en los países de América Latina ha visto frenado a causa de múltiples factores. Por un lado, el bajo costo de la mano de obra ha propiciado una inversión reducida en cualquier tipo de robotización. Además, cuando las industrias se han visto forzadas a introducir robots en sus procesos de fabricación, para no perder competitividad internacional, la falta de una política industrial que fomente el desarrollo de tecnología ha provocado que la industria latinoamericana importe robots a un alto costo.

Un aspecto importante de la robótica en México ha sido apoyar el proceso de enseñanza aprendizaje para formar a los futuros ingenieros en áreas relacionadas con el diseño y desarrollo de los elementos básicos de una automatización industrial, entre los que podemos mencionar: la electrónica, la mecánica, el control y la informática. Una prueba de ello ha sido el éxito que han tenido los concursos nacionales e internacionales de Minirobótica donde los estudiantes mexicanos tienen cada vez mayor participación. La razón de este éxito es que el diseño y fabricación de robots requiere de una gran parte de los conocimientos impartidos en los cursos a lo largo de la formación de un ingeniero, entre los que podemos mencionar los siguientes cursos comunes en las carreras de ingeniería: álgebra y geometría, ecuaciones diferenciales, estática y cinemática de cuerpo rígido, dinámica, máquinas eléctricas, diseño mecánico, servomecanismos, control clásico, control multivariable, electrónica analógica y digital, electrónica de potencia, computación, métodos numéricos, programación, y lenguajes de computadora.

A pesar de lo anterior, la gran mayoría de las Instituciones de Educación Superior (IES) que ofrecen formaciones afines con la ingeniería y la automatización, han sufrido siempre de falta de infraestructura en sus laboratorios, y muy en particular de robots industriales. Esto les impide cumplir completamente con sus objetivos académicos y muchas veces se refleja en la formación de sus egresados. El principal problema es el alto costo que tienen los robots industriales y que dificultan su adquisición. Además, cuando después de muchos esfuerzos, las IES logran la

adquisición de un robot, se encuentran con otra serie de problemas: 1) Se dan cuenta que compraron una “caja negra” a la que no pueden acceder para “abrirla” al proceso de aprendizaje de los estudiantes, 2) imposibilidad de conocer los detalles de diseño y fabricación del robot industrial ya que lo único que se proporciona es un manual de usuario, 3) un solo robot no es suficiente para grupos de más de 5 alumnos, y 4) se fomenta la dependencia tecnológica.

El proyecto que se presenta en este documento se focaliza en la construcción y diseminación en la IES de robots de tipo industrial que sean completamente “abiertos” a los estudiantes de ingeniería. De esta forma los estudiantes podrán contar con infraestructura de igual o mejor calidad que los robots importados, para fortalecer su formación académica. Además, para agregar una componente innovadora, se fabricarán robots de estructura mecánica poco convencional conocidos como robots de cinemática paralela.

Aunque no es nuevo, el concepto de robot paralelo no es muy común, pues los robots industriales típicamente usados son mecanismos antropomórficos de cadena abierta, con eslabones que actúan generalmente en serie (uno a continuación de otro). Los manipuladores seriales usualmente tienen gran alcance, una área de trabajo amplia y buena maniobrabilidad para alcanzar pequeños espacios; no obstante, este manipulador por ser de tipo Cantilever, tiene una rigidez muy mala, una dinámica pobre a velocidades altas y una dinámica de carga compleja en condiciones de operación. La figura 1(a) muestra un robot serial marca MITSUBISHI, modelo Movemaster EX, con cinco grados de libertad. Es posible apreciar que los actuadores (usualmente motores de corriente directa) están ubicados uno después de otro, es decir *en serie*, esto implica que el primer actuador (en la base del manipulador) tiene que soportar no únicamente el peso del objeto a desplazar sino también el peso de los cuatro actuadores restantes; el segundo actuador soporta el peso de los tres restantes, y así sucesivamente. Esto provoca que los motores empleen gran parte del par disponible en mover a los otros y no a desplazar la carga útil, lo que genera una muy poca eficiencia. En general, un robot serial puede desplazar solo el 5% de su peso en carga útil.

En la última década, se ha hecho un importante avance en la investigación de diseños alternativos de manipuladores basados en

los conceptos de cadena cinemática cerrada, para mejorar la rigidez y la razón peso-carga de los manipuladores convencionales de cadena abierta (Tsai, 1999). Por lo anterior, el interés en los robots paralelos se ha incrementado en los últimos años (Merlet, 1997). La estructura cinemática cerrada de los manipuladores paralelos, permite que sean manejados por actuadores localizados en la base del manipulador (articulaciones activas). Las demás articulaciones que unen a la base con el órgano efector son pasivas. La figura 1(b) muestra el diseño esquemático del primer robot paralelo del cual se tiene referencia, construido por Stewart (Stewart, 1965).

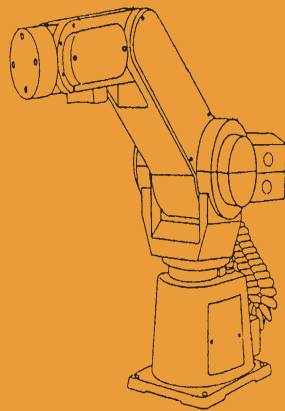


Fig. 4.3.2 Remoción de las Cubiertas

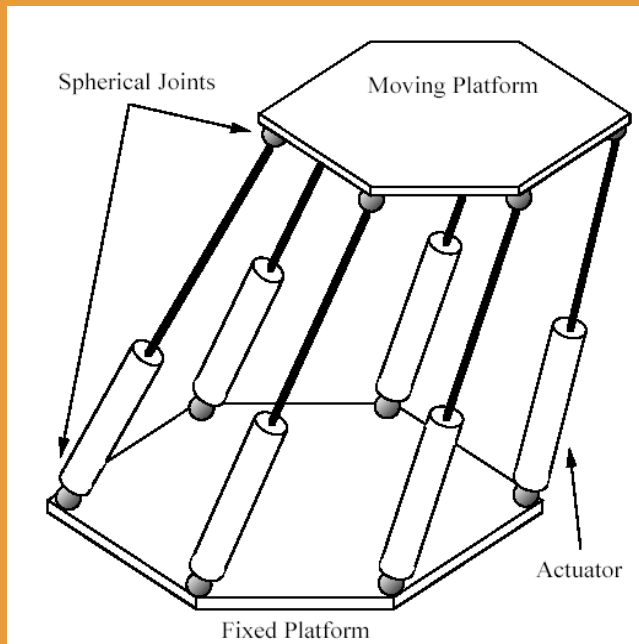


Figura 1. (a) Robot serial con 6gdl,
(b) Robot paralelo con 6gdl

En esa figura se pueden apreciar los elementos típicos de un robot paralelo: una plataforma fija (base del robot o tierra mecánica), una plataforma móvil (donde se localiza el órgano efector) y n cadenas cinemáticas (6 en este caso). Cada cadena cinemática está compuesta por tres articulaciones. Las articulaciones pueden ser esféricas (S), prismáticas (P), o rotatorias (R). En cada una de las cadenas debe haber únicamente una articulación activa (actuadores), el resto son pasivas. La figura 1(b) muestra que cada una de las 6 cadenas posee una articulación activa de tipo P y dos de tipo esférica (S). Por lo tanto, en este caso el robot se clasifica como robot paralelo 6SPS. Las articulaciones activas o actuadores (P) son cilindros con pistones que se encuentran ubicados de forma tal que ninguno de ellos soporta el peso de los otros. Los actuadores producen extensiones y contracciones de la cadena cinemática. El movimiento sincronizado de los pistones produce tres traslaciones y tres rotaciones de la plataforma móvil.

Ya que los actuadores no necesitan soportar más que el peso de la carga útil, ubicada en la plataforma móvil, se puedan seleccionar cadenas más ligeras que los de un manipulador serial. Por lo tanto, los manipuladores paralelos pueden disfrutar de beneficios potenciales asociados con construcción de peso ligero tal como operaciones de alta velocidad y mejora de la razón de peso-carga.

Debido a que la plataforma móvil es parte de la cadena cinemática cerrada y está unida a la plataforma fija, el área efectiva de trabajo es muy limitada, característica que pone en desventaja a los manipuladores paralelos con los seriales. Sin embargo, si el área de trabajo se conoce previamente, el manipulador puede diseñarse de tal modo que esto no represente una limitante (Merlet, 1995).

Entre las ventajas más importantes sobre los manipuladores serie se encuentran:

- Capacidad elevada de carga, ya que la carga la soportan todos los actuadores.
- Masa móvil reducida, debido a que los actuadores se encuentran en la base del robot, y no forman parte de la carga total.
- Posibilidad de movimientos de alta aceleración, cuando la carga útil es baja.
- Precisión en tareas de posicionamiento (Mouly, 1993), ya que no existe un error de posición acumulativo en las uniones, como sucede en los manipuladores seriales.

- Rigidez mecánica elevada, ya que la base fija y la base móvil forman una cadena cinemática cerrada.
- Posibilidad de colocar los actuadores directamente sobre la plataforma fija.
- Simplificación importante en las conexiones motores-sensores-controlador (cableado mínimo).
- Construcción mecánica modular y simplicidad de fabricación.

El caso de estudio de nuestro trabajo es un robot tipo 3RSS (Clavel,1991), como el mostrado en la figura 2(a).

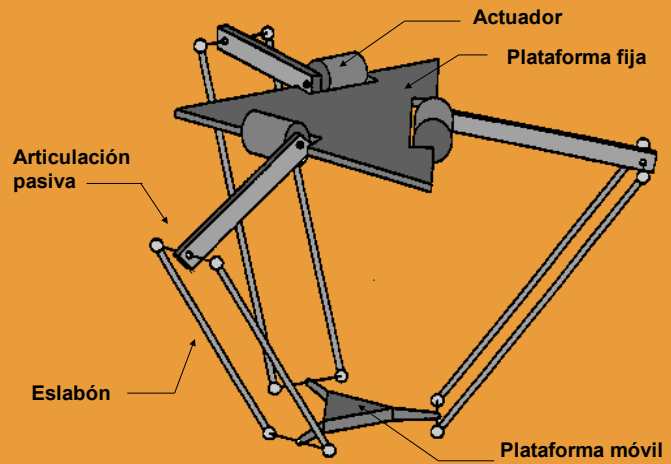
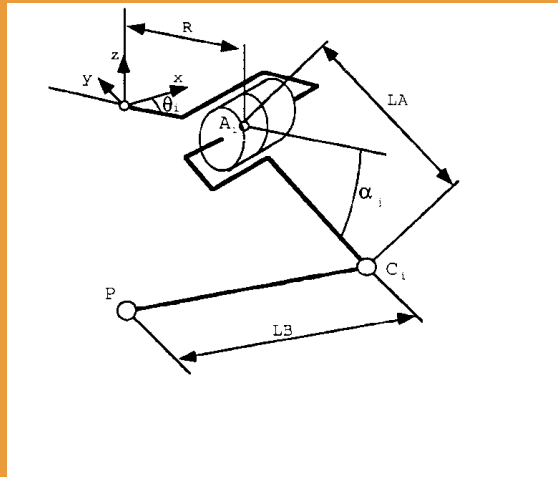


Figura 2. (a) Robot paralelo 3RSS tipo Delta, (b) esquema de una pierna del robot.

Se trata de un robot de tres grados de libertad con una estructura que asegura solamente movimientos de traslación para la plataforma móvil y no considera movimientos rotacionales. Los tres actuadores son motores de corriente directa y están ubicados sobre una plataforma fija.

2. LA CINEMATICA INVERSA DEL ROBOT PARALLIX LKF-2040

La cinemática inversa consiste en encontrar el valor numérico del ángulo θ_i que debe girar el motor i a partir del conocimiento de la posición de la plataforma móvil. Para resolverlo, consideremos una sola cadena cinemática del robot en cuestión, como se muestra en la Figura 2(b). Sin tomar en cuenta la rotación θ_i , las coordenadas del punto C_i son:

$C_i = (R + H \cos \alpha_i, 0, -H \sin \alpha_i)$ Si la rotación θ_i alrededor del eje Z es definida como:

$$Rot(Z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Entonces, las coordenadas de C_i se transforman de la siguiente manera:

$$C_i = ((R + H \cos \alpha_i) \cos \theta_i, (R + H \cos \alpha_i) \sin \theta_i, -H \sin \alpha_i)$$

Sea $P(x, y, z)$ el punto de conexión entre la cadena cinemática y la plataforma móvil. La ecuación de la esfera con centro en $P(x, y, z)$ será:

$$(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2 = B^2$$

Ya que el punto C_i pertenece a esa esfera concluimos que:

$$(R + H \cos \alpha_i \cos \theta_i - x)^2 + (R + H \cos \alpha_i \sin \theta_i - y)^2 + (-H \sin \alpha_i - z)^2 = B^2$$

Los valores numéricos de los ángulos θ_i son constantes: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 150^\circ$, $\theta_3 = 270^\circ$. De esta forma, las únicas incógnitas de la ecuación anterior son los ángulos α_i . Haciendo el despeje respectivo se tendrá:

$$\tan \frac{\alpha_i}{2} = \frac{-2z \pm \sqrt{4z^2 + 4R^2 - S^2 + Q_i^2 \left(1 - \frac{R^2}{H^2}\right) + Q_i \left(\frac{-2R}{H} - 4R\right)}}{-2R - Q_i \left(\frac{R}{H} - 1\right) - S}$$

Donde:

$$Q_i = 2x \cos \theta_i + 2y \sin \theta_i$$

$$S = \frac{1}{H} (-x^2 - y^2 - z^2 + B^2 - H^2 - R^2)$$

El espacio de trabajo del manipulador también ha sido estudiado ya que es una de las características fundamentales del manipulador. El trabajo descrito en (Ceccarelli, 1997) presenta diferentes métodos para determinar el espacio de trabajo de manipuladores mecánicos. El método utilizado en este trabajo es reportado en forma detallada en la tesis de (Sánchez-Flores, 2001), en (Castillo, 2002), y en (Márquez, 2002), este método se basa en la solución del modelo cinemático inverso para cada uno de los puntos del espacio a analizar, si para el punto en cuestión existe una solución válida del modelo inverso, entonces se considera que el punto pertenece al espacio de trabajo alcanzable por el manipulador. Los resultados obtenidos de este estudio se muestran en la figura 3. Las dimensiones consideradas son: LA = 200 mm, LB = 400mm, R = 150mm, r = 50mm. Un estudio detallado sobre el espacio de trabajo y el dimensionamiento del robot se puede consultar en (Balmaceda, 2010).

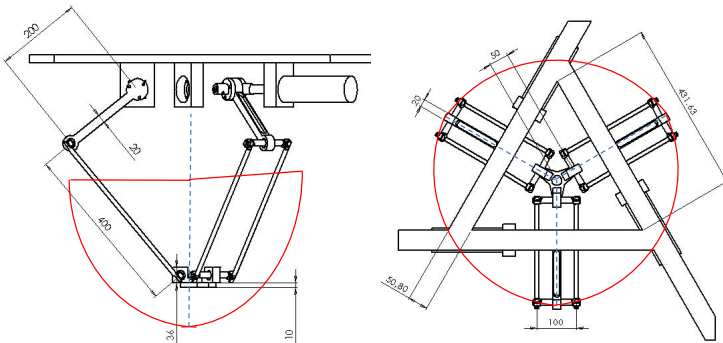


Figura 3. Espacio de trabajo del robot Parallax LKF-2040.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico del robot está compuesto por tres elementos principales: 1) Una base (plataforma fija) construida con PTR, 2) Un elemento terminal (plataforma móvil) construido en aluminio, y 3) Tres piernas articuladas (cadenas cinemáticas) construidas en aluminio y acero inoxidable. La figura 4(a) muestra los elementos principales del sistema mecánico.

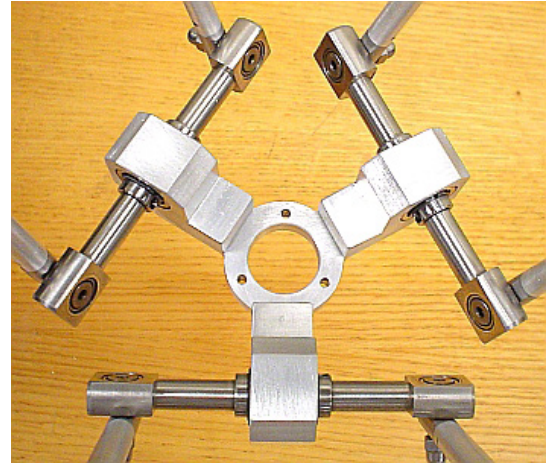


Figura 4. (a) Elementos del robot Parallax LKF-2040, (b) la plataforma móvil.

La base sirve de soporte para los servomotores, también de soporte para el controlador, y para el montaje del cableado; su estructura cúbica brinda rigidez al sistema mecánico y le permite estabilidad durante el movimiento del robot. El elemento terminal está diseñado para facilitar el montaje de una herramienta o de un órgano efector para el robot (pinza, ventosa, electroimán, etc.). Está fabricado de aluminio para reducir el peso del robot y aumentar la carga útil. Cada pierna está formada por cuatro elementos: un segmento de entrada (biela), un contrapeso, y dos segmentos de salida (varillas), estos últimos son parte de un mecanismo 4-barras que impide las rotaciones del elemento terminal del robot. La biela y las varillas están unidas mediante flechas articuladas de acero inoxidable. Las articulaciones en las flechas son rodamientos del tipo *CAM-followers* que proporcionan gran suavidad de movimiento y reducen el juego mecánico. Las flechas giran libremente sobre rodamientos de agujas que se encuentran montados en la biela y en el elemento terminal.

4. DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR

Para poder efectuar el control de movimiento del mecanismo paralelo de tres grados de libertad, se llevó a cabo el diseño y construcción de un controlador de tres ejes para motores de corriente directa que utilizan un encoder incremental en cuadratura como sensor de posición. El controlador se encuentra alojado en un gabinete de tipo industrial con dimensiones de 40x30x15 cm. El gabinete cuenta con doble ventilación, un ventilador para la entrada y otro para la salida de aire. La figura 5 presenta una fotografía del gabinete.

En el interior del gabinete se encuentran alojados los siguientes elementos:

- 2 ventiladores de 120 VCA.
- 3 fuentes de voltaje de 70 watts, 24 VCD, 3A.
- 3 tarjetas de control de movimiento tipo PIC-SERVO SC.
- 1 tarjeta convertidora para conexión con el puerto USB de una PC.
- 1 tarjeta de entradas/salidas digitales.
- 1 fuente de voltaje 7.5-12 VCD, 500 mA.

La tarjeta PIC-SERVO SC es un sistema completo de control en lazo cerrado con las siguientes características:

- Proporciona control en lazo cerrado tipo PID para motores de CD con encoders incrementales, incluyendo perfiles trapezoidales de velocidad y movimientos multi-ejes coordinados.
- Posee amplificadores LMD18200 con la capacidad de manejar 3A continuamente hasta 48 VCD.
- Permite protección contra sobretemperatura, sobre-corriente y bajo-voltaje.
- Sensado de corriente, limitación activa de corriente, y protección contra sobre-voltaje.
- Provee señales PWM y DIR para usarlas con amplificadores externos, en caso de requerir mayor potencia de salida.



Figura 5. Gabinete que aloja al controlador.

- La interface RS485 permite hasta 32 PIC-SERVO SC a partir de un solo puerto USB.
- Ofrece dos entradas para interruptores de fin de carrera.
- Incluye software de prueba del tipo 32 bit Windows DL y código fuente para lenguaje C y BASIC.

5. INTERFACE GRÁFICA USUARIO

La interface gráfica ROBWIN Versión 2.0 (Castillo, 2010) es una aplicación de una sola ventana ejecutable bajo Windows XP y programada en Visual C++. Esta interface permite la comunicación con el controlador del robot para su operación. A diferencia de las interfaces gráficas utilizadas en robots comerciales, esta interface permite la programación de los desplazamientos del robot sin la especificación de algún lenguaje en especial. De esta forma, la programación de desplazamientos se realiza en forma sencilla y rápida. La ventana principal de ROBWIN Versión 2.0 se presenta en la figura 6. En la parte izquierda se encuentran 6 opciones principales que indican al usuario la secuencia que debe seguirse para efectuar movimientos en el robot. ROBWIN Versión 2.0 cuenta con 5 grupos de comandos organizados en el mismo número de ventanas.

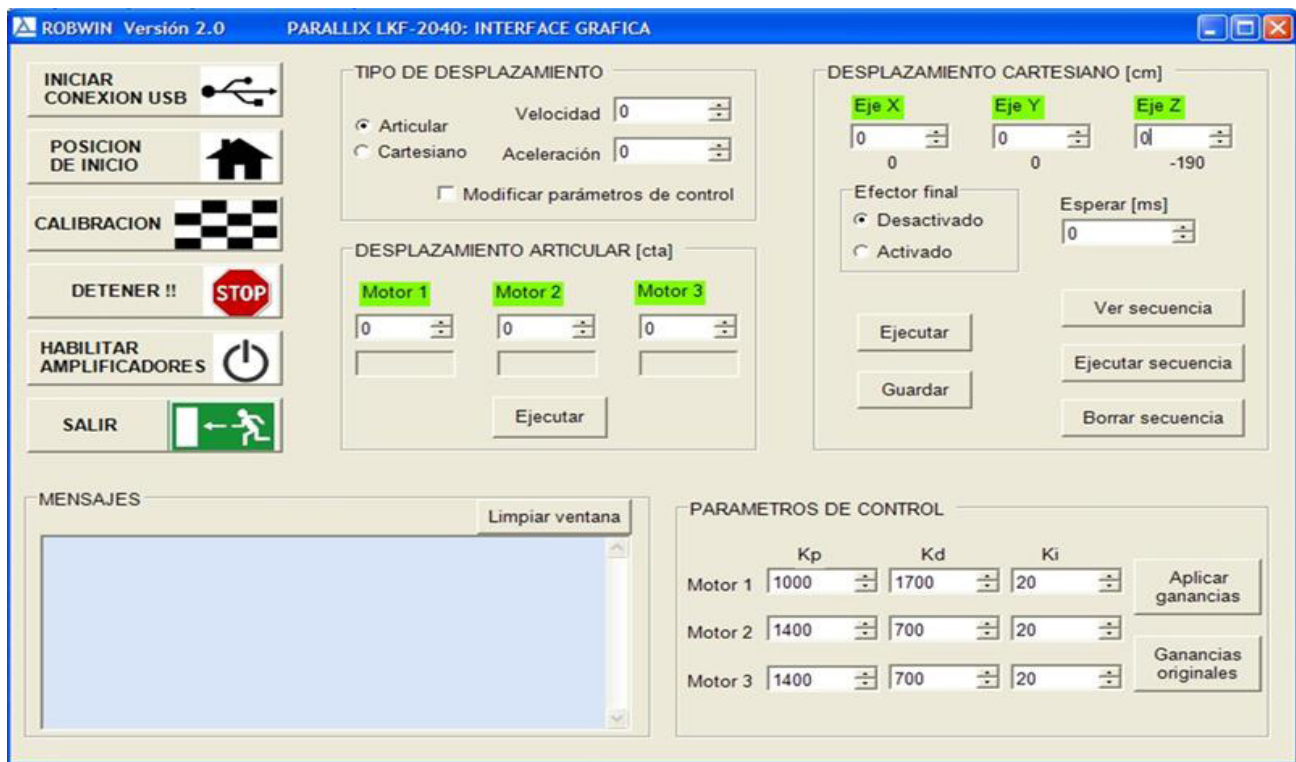


Figura 6. Interface gráfica ROBWIN Versión 2.0.

Tipo de desplazamiento: En esta ventana, el usuario puede especificar el tipo de desplazamiento a realizar así como la velocidad y la aceleración del desplazamiento, según un perfil trapezoidal de velocidad.

Desplazamiento articular: En esta ventana se especifican y ejecutan desplazamientos en el espacio articular del robot, es decir movimientos angulares independientes para cada servomotor. La posición objetivo articular está dada por tres valores enteros correspondientes al ángulo que debe girar cada motor.

Desplazamiento cartesiano: En esta ventana se especifican y ejecutan desplazamientos definidos en el espacio cartesiano del robot. La posición objetivo está dada por tres valores enteros correspondientes a las coordenadas (X,Y,Z) a las que se desea llevar a la plataforma móvil.

Parámetros de control: Su función es permitir a un usuario con entrenamiento especial, y con sólida formación en Control Automático, la modificación de la sintonización de los lazos cerrados de control para cada servomotor.

Ventana de mensajes: Esta ventana es el medio para que ROBWIN versión 2.0 despliegue la información al usuario sobre el estado que guarda la operación del robot.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Precisión y repetibilidad

Durante este trabajo, se desarrolló una metodología utilizando análisis de imágenes para determinar la exactitud y la repetibilidad del robot Parallax LKF-2040, con base a la norma ISO 9283 y que puede ser utilizada en robots manipuladores; esta norma aporta las pruebas, métodos de ensayo y formatos de presentar los resultados para evaluar 14 características de desempeño. Sólo se abordaron las pruebas de exactitud y repetibilidad. La metodología consiste en adherir un patrón de localización al elemento efector, ver figura 7(a); programar al robot posiciones normalizadas descritas en ISO 9283 y colocar una cámara, calibrada previamente, de tal forma que pueda observar el elemento efector final del robot en diferentes posiciones del espacio de trabajo.

Las imágenes adquiridas son entonces procesadas para extraer las matrices de localización que describen la posición y la orientación del elemento efector del robot. Finalmente, la posición y la orientación estimadas se comparan con las posiciones programadas (figura 7(b)) para determinar la

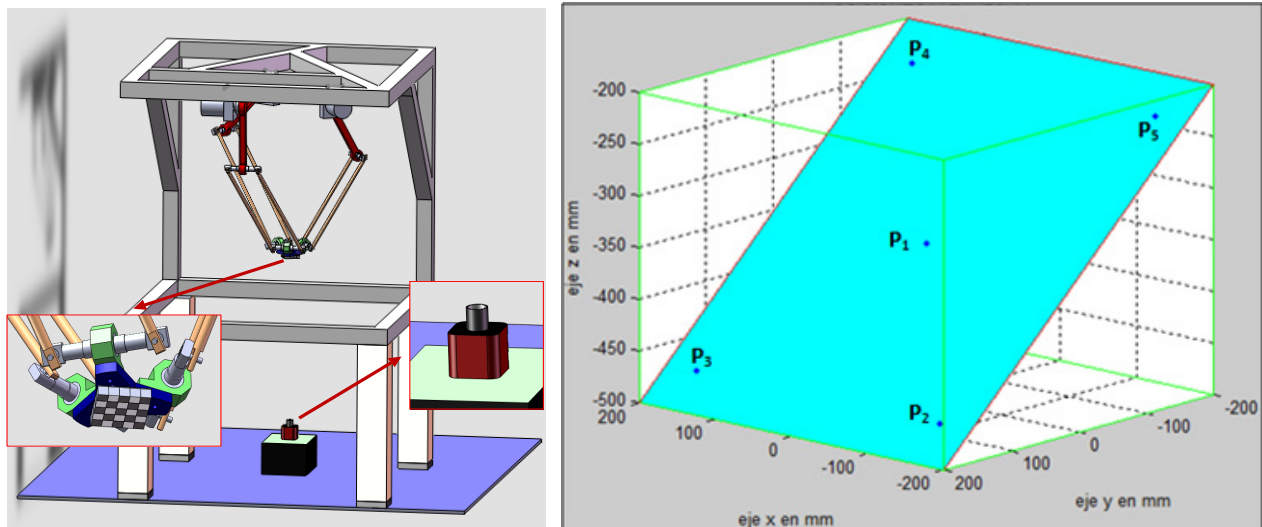


Figura 7.(a) Localización del patrón para precisión y repetibilidad, (b) Puntos del espacio de trabajo a evaluar.

exactitud y repetibilidad aplicando la norma ISO 9283. Los resultados de este trabajo están detallados en la tesis de (Rodríguez, 2011). Los resultados se presentan en la figura 8.

POSICIONAMIENTO [mm]						
Posición	Exactitud			Repetibilidad		
	AP_x	AP_y	AP_z	RP_l		
P1	5.31	10.05	4.21	1.15		
P2	6.26	9.35	5.21	1.57		
P3	3.65	8.66	2.07	0.91		
P4	4.71	9.67	5.30	2.48		
P5	3.28	7.34	2.97	1.94		
ORIENTACION [°]						
Posición	Exactitud			Repetibilidad 1×10^{-14}		
	AP_a	AP_b	AP_c	RP_a	RP_b	RP_c
P1	1.34	0.47	1.17	0.02	0.10	0.07
P2	1.28	0.45	2.97	0.03	0.02	0.27
P3	1.24	0.46	2.99	0.26	0.00	0.149
P4	1.35	0.45	2.99	0.03	0.04	0.16
P5	1.30	0.46	2.79	0.15	0.016	0.049

Figura 8. Resultados para la prueba de exactitud y repetibilidad en posición y orientación

6.2 Rigidez

Durante este trabajo, se desarrolló una metodología para cuantificar la rigidez del robot a partir de las mediciones de los desplazamientos producidos bajo niveles diferentes niveles de carga. La rigidez en un robot paralelo es de vital importancia ya que las fuerzas presentes en sus elementos no deben provocar desplazamientos significativos en su estructura. Estos desplazamientos afectan la precisión de su

posicionamiento al conocerlos se podrán realizar los ajustes necesarios para mejorar su precisión en el posicionamiento. La metodología usa análisis de imágenes para medir los desplazamientos provocados por fuerzas aplicadas a su plataforma móvil y con esto calcular la rigidez en una posición específica de la plataforma móvil del robot, ver figura 9.

Figura 9. Base experimental para estimar la rigidez.



Los resultados obtenidos se presentan en detalle en (González, 2011). Las gráficas de la figura 10 corresponden a los desplazamientos observados en una posición (0,0,-520 mm) del elemento efector del robot para tres niveles de carga diferente. Podemos observar como los desplazamientos son mayores sobre los ejes X e Y.

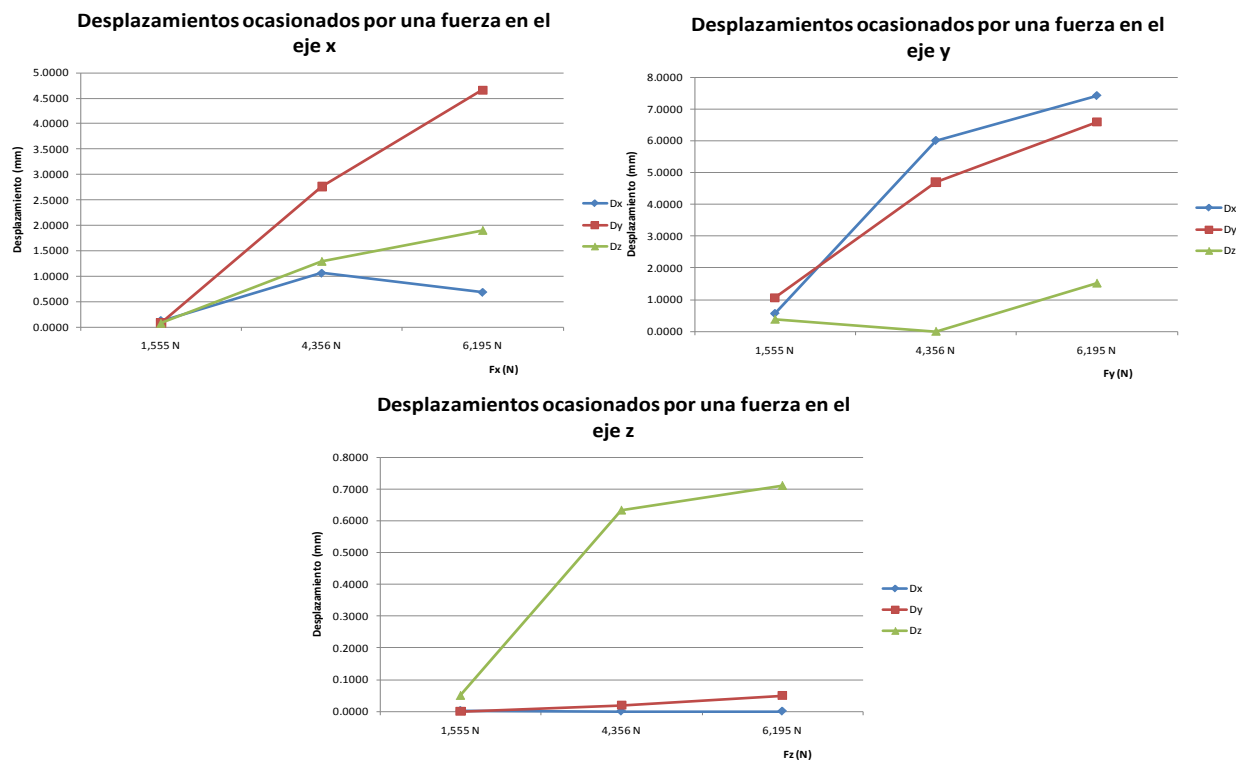


Figura 10. Resultados sobre la rigidez del robot, considerando el elemento efector.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta los detalles de diseño, fabricación, y validación experimental del robot Parallax LKF-2040. El estudio y las aplicaciones de robots paralelos se han intensificado en los últimos años. Las razones son básicamente tres: la facilidad de construcción, la simplicidad de la dinámica originada por el hecho de tener los actuadores fijos en la base, y las altas aceleraciones permitidas. Uno de los inconvenientes de este tipo de mecanismos es el espacio reducido de trabajo. Sin embargo, si el espacio de

trabajo es conocido, como es comúnmente el caso en aplicaciones industriales, el robot puede ser geométricamente diseñado para garantizar un buen desempeño. El resultado presentado en este trabajo aborda el análisis de la cinemática inversa de este tipo de mecanismos, el estudio del espacio de trabajo, la determinación de las configuraciones singulares, el diseño y construcción de una arquitectura de control, el diseño mecánico y construcción del robot, las pruebas experimentales de control de movimiento, la estimación de la precisión y repetibilidad, y el estudio de rigidez del robot.

BIBLIOGRAFÍA

- (Balmaceda, 2010) Balmaceda Santamaría A.L., Castillo Castañeda E., Diseño de especificaciones técnicas y desarrollo de un robot paralelo traslacional con 3 gdl para tareas de carga descarga industrial, Semana de la Ciencia y la Innovación 2010, México, D.F, 2010.
- (Castillo, 2002) Castillo-Castaneda, E., Sánchez-Flores, A., López-Cajún, C. (2002) "Mathematical Characterization of the Workspace of a 6 dof Parallel Robot for Reverse Engineering", 14th CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, July 1-4, Udine, Italy, 2002.
- (Castillo, 2008) Castillo-Castaneda E., Takeda Y., Improving Path Accuracy of a Crank-type 6-dof Parallel Mechanism by Stiction Compensation, MECHANISM AND MACHINETHEORY, ISSN: 0094-114X, Vol. 43, pp. 104-114, 2008.
- (Castillo, 2010) Castillo-Castaneda E., Registro Público del Derecho de Autor, Número de registro: 03-2010-060210431600-01, Autor: Castillo Castañeda Eduardo, Título: ROBWIN: Interface gráfica usuario para el robot PARALLIX LKF-2040, Titular: Instituto Politécnico Nacional, fecha: 17 de Junio de 2010.
- (Ceccarelli, 1997) Ceccarelli, M. (1997). "A formulation for the workspace boundary of general n-revolute manipulators", *International Journal of Mechanism and Machine Theory*, 32:895-902, 1997.
- (Clavel, 1991) Clavel, R. (1991) "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté", *Tesis doctoral, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Suiza, 1991.
- (Dombre, 1998) Dombre, E., Khalil, W. (1988) "Modélisation et commande des robots", *Editions Hermès*, Paris, Francia, 1998.
- (González, 2011) González Hernández A., Castillo Castañeda E., Zavala de Paz J., Metodología para la obtención de la rigidez en un robot paralelo, Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Morelos, México, 2011.
- (Márquez, 2002) Márquez-Santoyo, P., Castillo-Castañeda, E., Camacho-Velázquez, R. (2002) "Motion Control Study of a 3RSS Parallel Mechanism", *International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*, Ciudad de México, México, 2002.
- (Merlet, 1995) Merlet, J.P. (1995) "Designing a parallel manipulator for a specific workspace", *Raport de Recherche No. 2527*, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Francia, 1995.
- (Merlet 1997) Merlet, J.P. (1997) "Les robots parallèles", *Collection robotique, Editorial HERMES*, Francia, 1997.
- (Mouly, 1993) Mouly, N. (1993) "Développement d'une famille de robots parallèles a motorisation électrique", *Tesis de doctorado, Ecole Supérieure de Mines de Paris*, Francia, 1993.
- (Pierrot, 1991) Pierrot, F., Dauchez, P., Fournier, A. (1991) "Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications", *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1288-1293, Sacramento, USA, 1991.
- (Rodríguez, 2010) Rodríguez-Vázquez A.O, Castillo-Castañeda E., Cálculo de la exactitud y la repetibilidad de robots manipuladores utilizando visión por computadora, sometido a la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Junio 2011.
- (Sánchez, 2001) Sánchez-Flores, A. (2001) "Cálculo de la Cinemática Inversa y el Espacio de Trabajo de un Manipulador Paralelo de 6 Grados de Libertad", *Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Universidad Autónoma de Querétaro*, México, Noviembre, 2001.
- (Sánchez, 2000) Sánchez-Flores, A., Castillo-Castaneda, E. (2000) "Cálculo del espacio de trabajo para el diseño de un robot paralelo de seis grados de libertad", *6ª Conferencia de Ingeniería Eléctrica CIE 2000*, Ciudad de México, México, 2000.
- (Stewart, 1965) Stewart, D. (1965) "A platform with 6 degrees of freedom", *Proc. of the Institute of Mechanical Engineers (Parte 1, 15)*, pp 371-386, 1965.
- (Takeda, 1999) Takeda, Y., Funabashi, H., Kimura, M. (1999) "Development of a Spatial Six-Degree of Freedom In-Parallel Actuated Worktable with Rolling Spherical Bearings", *In Proceedings of the Ninth International Conference on Advanced Robotics*, pp 551-556, Tokio, Japón, Octubre 25-27, 1999.
- (Tsai, 1999) Tsai, L.W. (1999) "Robot analysis", *John Wiley & Sons, Inc*, 1999.