

DISEÑO ÓPTIMO DE UN ROBOT PARALELO CON CONFIGURACIÓN DELTA PARA APLICACIONES EDUCATIVAS

Edison Martínez y César Peña

Universidad de Pamplona, Pamplona (Colombia)

Eugenio Yime

Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias (Colombia)

Resumen

Este artículo presenta la descripción general de una plataforma experimental para la enseñanza de robots paralelos y diversos temas de control incluyendo tele-operación con retardos en el canal de comunicaciones. Ilustra los cálculos de cinemática inversa y la obtención del espacio de trabajo de un robot paralelo tipo delta incluyendo un análisis de interferencia de los eslabones. También presenta el procedimiento para el cálculo de las dimensiones óptimas del robot con el fin de maximizar el volumen del espacio de trabajo.

Palabras clave: Robots paralelos, algoritmos genéticos, robots educativos, diseño óptimo

Abstract

This paper presents a general description of experimental platform for teaching parallel robots and several control subjects including tele-operation with delays in the communications channel. It shows the inverse kinematics algorithms, and the computation of the parallel robot workspace, a link interference analysis is included. A method to estimate the optimal dimension of the robot in order to maximize the workspace volume also is presented.

Keywords: Parallel robot, genetic algorithms, educational robots, optimal design

Introducción

Un robot paralelo (robot de cadena cinemática cerrada), es todo aquel robot cuyo efector final,

con n grados de libertad, se encuentra unido a la base por más de una cadena cinemática independiente (Tsai, 1999). Esta condición hace que los manipuladores paralelos tengan una

mayor rigidez (estabilidad estructural), puedan trabajar a mayor velocidad, mayor relación carga/peso y cuenten con más precisión que los robots de cadena abierta o seriales, que son los más comunes en la industria y en la academia (Merlet 2002). Sin embargo, los robots paralelos tienen una estructura más elaborada y por tanto, requieren de un análisis cinemático, un diseño, y unos esquemas de control de mayor complejidad; lo cual sumado al limitado espacio de trabajo, genera un freno en el desarrollo temprano de los sistemas paralelos.

En los últimos años el uso de las computadoras y el desarrollo de nuevas técnicas de análisis han permitido el redescubrimiento y aplicación de los sistemas robóticos paralelos, es así que en la actualidad existe una gran cantidad de estructuras paralelas (Siciliano, 2008), las más comunes van de dos a seis grados de libertad originando un campo muy diverso de aplicaciones especialmente para posicionamiento, como en telescopios Vista del Observatorio Europeo Austral (ESO, 2010), simuladores de vuelo y de conducción; así mismo, se han desarrollado aplicaciones para los procesos de manufactura de alta velocidad, y en la industria de alimentos (en el área de empaquetado) se cuenta con los robots tipo Delta y otras plataformas, usadas para rehabilitación como la plataforma Motek (Lees, *et al.*, 2007).

Los robots tipo delta fueron propuestos por Clavel (1986) y su publicación se realizó en 1989. La principal característica es que sus tres grados de libertad son lineales. El estudio de estos robots se ha concentrado en la solución de los problemas asociados con el cálculo de la cinemática, a través de la formulación algebraica y numérica (Merlet, 2004), eliminación algebraica (Lee, 2002), el enfoque básico Groebner (Raghavan, 1991), (Merlet 2004), que buscan encontrar las raíces de los polinomios o solucionar las ecuaciones no lineales, otros enfoques en este sentido han llevado a la aplicación de la inteligencia artificial (Dehghani, *et al.*, 2005), (Mustafa, *et al.*, 2008),

así como el uso de sensores auxiliares para facilitar la solución de la cinemática (Angel, *et al.*, 2005), para el análisis dinámico se puede consultar a (Staicu, *et al.*, 2003).

En cuanto al diseño de este tipo de robots los estudios apuntan a la optimización de las dimensiones del robot, para mejorar su desempeño y maximizar el espacio de trabajo, (Zhongfei, *et al.*, 2008) y optimizar el diseño por análisis de la rigidez global (Courteille, *et al.*, 2009). En Colombia se han realizado estudios de relacionados con la estructura, el análisis y el control de robots paralelos (Vivas, 2005; 2006).

Los robots delta están siendo aplicados a nivel industrial como manipuladores en líneas de empaquetado de alta velocidad por compañías como Bosch, ADEPT, ABB Robotics, entre otras.

El desarrollo actual de los robots paralelos y específicamente del tipo delta, hace necesario el estudio, análisis y enseñanza de este tipo de manipuladores en las universidades colombianas, con el fin de aumentar la competitividad de los profesionales de las áreas de ingeniería mecatrónica, mecánica, electrónica y afines.

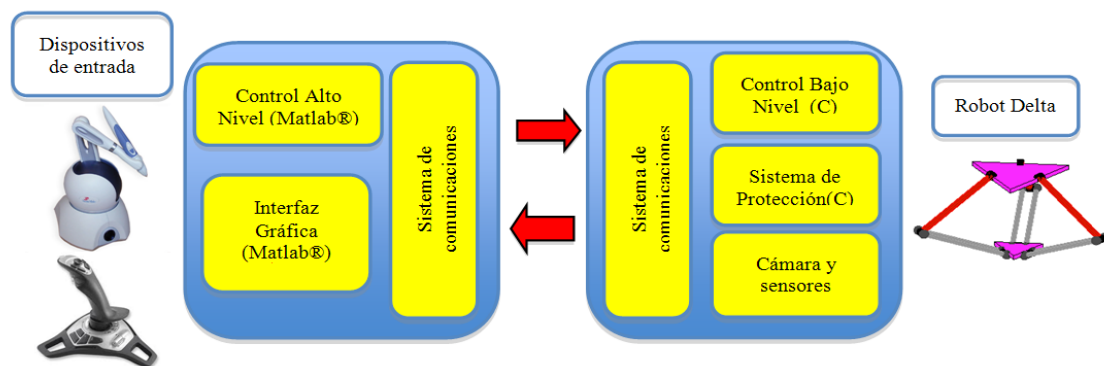
Descripción de la plataforma propuesta

El robot paralelo tipo delta diseñado, hace parte de una plataforma experimental que tiene como objetivo facilitar la enseñanza de diversos temas, tales como: robots paralelos, control cinemático y dinámico de robots, sistemas avanzados de control y teleoperación de robots, teniendo en cuenta el retardo en el canal de comunicaciones. En la gráfica 1 se puede apreciar el diagrama esquemático de la plataforma, la cual se puede describir en dos partes fundamentales: una de ellas está conformada por el robot paralelo, un sistema de control a bajo nivel, un sistema de comunicaciones y un sistema de protección y tratamiento de emergencias.

El sistema control a bajo nivel, se encarga de controlar los accionamientos del robot de tal forma que se puedan implementar las referencias dadas por el control a alto nivel. A su vez se encarga de capturar y transmitir las medidas de los sensores. El control a bajo nivel tiene tres modos de operación: control por corriente, por velocidad y por posición. Estos modos de operación aportan la flexibilidad necesaria para implementar los principales esquemas de control en el sistema de alto nivel.

El sistema de protección y tratamiento de emergencias se encarga de verificar continuamente los movimientos del robot evitando las colisiones y posibles daños de sus propios componentes. Este sistema se implementó teniendo en cuenta que la plataforma se utilizará para la corroboración práctica, de diferentes sistemas de control diseñados por estudiantes, por lo cual estos pueden contener errores que pueden desestabilizar los accionamientos sistema. Este debe ser capaz de detectar las posibles anomalías o emergencias y tratarlas adecuadamente para evitar daños al robot.

Gráfica 1. Diagrama esquemático de la plataforma.



Todos los algoritmos de control a bajo nivel, el sistema de comunicaciones y el sistema de protección y tratamiento de emergencias, fueron implementados en lenguaje C, con el fin de poder realizar un gran número de operaciones con una frecuencia bastante alta.

La otra parte de la plataforma experimental está compuesta por el controlador a alto nivel, el sistema de comunicaciones y opcionalmente dispositivos de entrada con o sin reflexión de fuerzas.

Con el fin de facilitar el aprendizaje de los estudiantes se eligió Matlab® como el software para la implementación del control a alto nivel. Esto permite la implementación rápida de diversos controladores y el uso de las librerías (*Toolbox*) que posibilitan la creación de controladores

complejos, tales como: controladores robustos, adaptativos, deslizantes, no lineales, difusos, neuronales e híbridos, entre otros.

La comunicación entre las dos partes de la plataforma se realiza enviando mensajes a través de la red, usando el protocolo de datagramas de usuario (Comunicación UDP). Este tipo de comunicación es rápida en la red para su control a distancia, pero además, permite ubicar las dos partes de la plataforma sobre el mismo computador reduciendo el retardo.

Uno de los objetivos de seleccionar este tipo de comunicación es poder montar en el laboratorio de robótica de la Universidad de Pamplona, Pamplona (Colombia), un módulo que contenga el robot y sus accesorios físicos. De tal forma que los estudiantes de diferentes universidades

de Colombia o del exterior, a través del acceso a un sistema de gestión de usuarios, puedan comunicarse con el robot e interactúen con el mismo, al probar el sistema de control que se estén diseñando. Para esto los estudiantes solo requirieren poseer Matlab® que es una herramienta muy común hoy en día en el campo de la ingeniería. Se busca que los estudiantes bajen una plantilla realizada en Simulink en la Internet, que contiene los bloques correspondientes a: el modelo cinemático y dinámico de robot, la interfaz gráfica y el bloque de comunicación con el robot real. Así, por medio de unos interruptores en Simulink los usuarios podrán seleccionar dos modos de funcionamiento: modo simulación y modo experimental. Y una vez los estudiantes hayan construido los controladores y simulado exitosamente, se podrán conectar con el laboratorio de la Universidad vía Internet y realizar las pruebas experimentales.

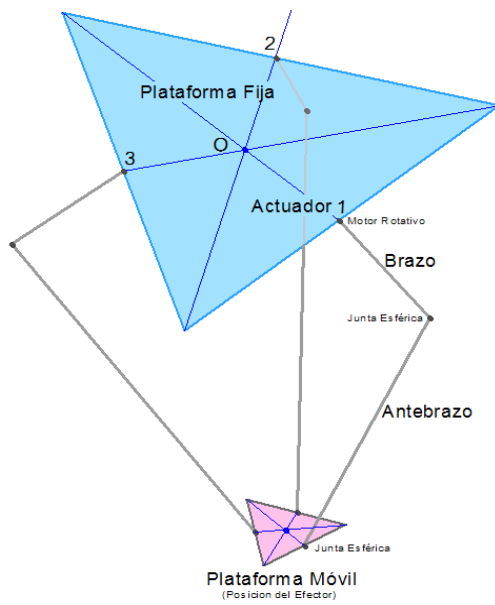
En el caso de tener la plataforma experimental alojada en dos computadores ubicados en lugares separados se usará una cámara para que el usuario pueda ver los movimientos del

robot. El envío de las imágenes provenientes de la cámara se puede realizar en línea o fuera de línea dependiendo los retardos en el canal de comunicaciones con que se deseen trabajar. En caso de enviarse las imágenes fuera de línea el usuario podrá observar los movimientos del robot por medio del bloque de la interfaz gráfica implementada para Simulink.

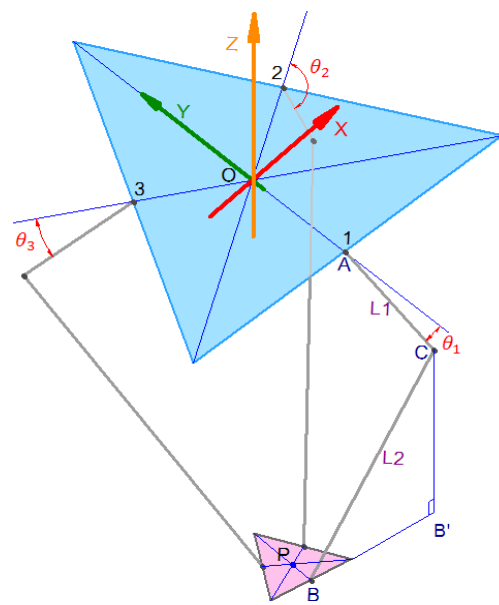
Cinemática inversa de robot

La gráfica 2 muestra el esquema simplificado de un robot tipo delta, que consta de dos plataformas: la fija, en la cual se ubican los actuadores que para este tipo de robot consisten en motores rotativos, colocados a la misma distancia del centro O en los puntos 1, 2 y 3 y la plataforma móvil que porta el efector del robot, ubicada adecuadamente en el centro del triángulo. Las dos plataformas están unidas entre sí por tres estructuras de barras idénticas conformadas por un brazo solidario a cada uno de los motores y por un antebrazo, este último está unido al brazo y a la plataforma móvil por medio de juntas esféricas.

Gráfica 2. Esquema del robot tipo delta



Gráfica 3. Parámetros geométricos



El problema cinemático en un robot consiste en encontrar la relación de la posición del efector final y los ángulos (o posiciones) de los actuadores, en el caso del robot tipo delta, el análisis cinemático inverso busca encontrar la relación entre la posición de la plataforma móvil, específicamente el punto P [X0, Y0, Z0] y los ángulos de los brazos θ_1 , θ_2 y θ_3 donde están colocados los motores, como se muestra, en la gráfica 3. El brazo tiene una longitud L1 y el antebrazo L2, éstos se toman como referencia para el análisis los puntos A, B y C.

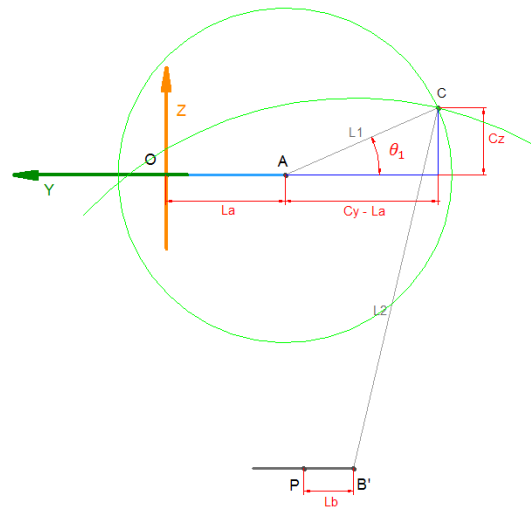
Cinemática inversa

El objetivo es encontrar el ángulo de cada uno de los actuadores conociendo la posición del efector final, este problema se produce cuando se tienen las coordenadas de un objeto que se quiere manipular, y se desea saber el ángulo que debe suministrar el sistema de control a cada motor.

Debido a la restricción de la junta A el brazo describe una circunferencia de radio L1, mientras

que con respecto al punto B, el punto antebrazo puede describir una esfera de radio L2, la intersección de la circunferencia y la esfera se produce en dos puntos, se toma como solución el punto con menor valor en la coordenada Y. Al determinar la posición del punto C se puede obtener el ángulo θ_1 del actuador, como se muestra en la gráfica 4.

Gráfica 4. Vista lateral para el análisis geométrico(Parámetros)



Coordenadas del punto P, B, A y B'

$$P(x_0, y_0, z_0); \quad B(x_0, y_0 - L_b, z_0); A(0, -L_a, 0); \quad B'(0, y_0 - L_b, z_0)$$

Con las coordenadas de los puntos descritos anteriormente, se plantea un sistema de dos ecuaciones no lineales que permita encontrar la posición del punto C, con la cual se puede calcular el ángulo que forma el brazo con el plano horizontal, obteniendo así la solución esperada.

Sistema de ecuaciones

$$(C_y - L_a)^2 + (C_z - A_z)^2 = L_1^2 \quad (1)$$

$$(C_y - B'_y)^2 + (C_z - B'_z)^2 = L_2^2 - x_0^2 \quad (2)$$

Solucionando este sistema de ecuaciones (1) y (2) se llega a la siguiente ecuación cuadrática (3) que sirve para definir cuando la solución.

$$aC_y^2 + bC_y + c = 0 \quad (3)$$

Donde los valores de a, b y c son:

$$a = \left(1 + \frac{L_a - y_0 + L_b^2}{z_0} \right) \quad (4)$$

$$b = \left(2 \left(\frac{L_a - y_0 + L_b}{z_0} \right) \left(\frac{L_2^2 - x_0^2 - z_0^2 - L_1^2 - L_a^2}{2z_0} \right) - 2L_a \right) \quad (5)$$

$$c = \left(\frac{L_2^2 - x_0^2 - z_0^2 - L_1^2 - L_a^2}{2z_0} - L_a^2 - L_1^2 \right) \quad (6)$$

Cuya solución general es de la forma mostrada en (7)

$$c_{y_{1-2}} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

Que tiene sentido solo cuando el argumento de la raíz cuadrada es positivo; de las dos posibles soluciones se toma la menor de las dos.

El valor del ángulo del brazo 1 se calcula con la formula (8)

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{C_{z1}}{L_a - C_{y1}}\right) \quad (8)$$

Para los otros brazos se usa la matriz de rotación con un ángulo de 120° para el brazo 2 y 240° para el 3. Esta matriz de rotación permite girar el sistema de coordenadas de manera que se pueda usar la solución descrita para el cálculo de los restantes ángulos. Esta solución se validó a través de una aplicación en Matlab®.

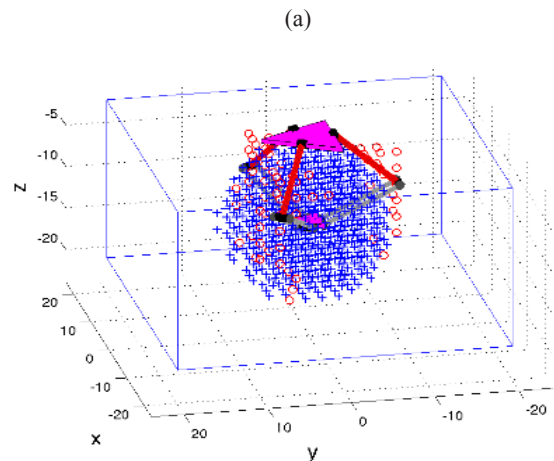
Espacio de trabajo teniendo en cuenta las interferencias

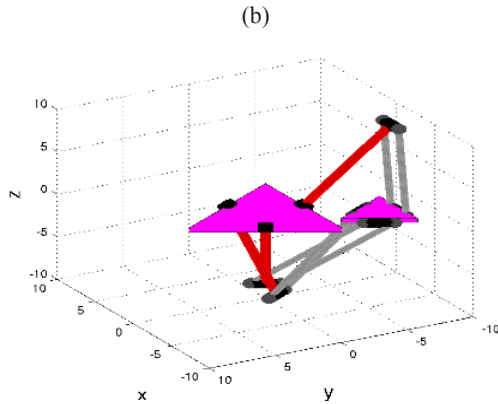
Los robots paralelos se caracterizan por tener grandes prestaciones en cuanto a velocidad, rigidez, alta relación entre la capacidad de carga y peso del propio robot, lo cual ha impulsado significativamente sus aplicaciones en las últimas décadas. Sin embargo, estos robots presentan una desventaja frente a los robots seriales y es su reducido espacio de trabajo.

El robot paralelo con configuración delta es ampliamente usado en la industria por esta razón, se han realizado múltiples investigaciones en cuanto a su diseño (Zhongfei, et al, 2008), (Courteille, et al, 2009). Algunos de los resultados más relevantes radican en la sustitución de las articulaciones rotacionales por actuadores lineales. Aunque estas sustituciones, producen una ampliación del espacio de trabajo, reducen significativamente la velocidad del efector final, esto se debe a que los actuadores lineales no suelen alcanzar velocidades altas. Por esta razón en este artículo se hace una optimización de la estructura tipo delta sin modificaciones con el fin de obtener la relación entre los diferentes parámetros dimensionales del robot, manteniendo sus prestaciones de alta velocidad que es una de sus principales características.

Para el cálculo del espacio de trabajo del robot, se escoge un volumen predeterminado, se toma un número significativo de puntos equidistantes dentro del mismo y se evalúa la cinemática inversa en cada uno de esos puntos para corroborar si el robot puede o no llegar a esta posición. En la gráfica 5 (a) se puede apreciar este procedimiento.

Gráfica 5. (a) Evaluación de los puntos de un volumen para la obtención del espacio de trabajo. (b) Robot en un punto que incurre en una interferencia.

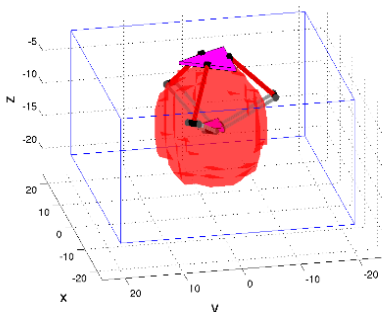




También, en la gráfica 5 (a) se pueden apreciar los puntos que puede alcanzar el robot delta representados con el símbolo “+”. La ventaja de obtener el espacio de trabajo discretizando el volumen en puntos es que se puede realizar diversos tipos de verificaciones para cada uno de ellos. En este trabajo por ejemplo se tomaron consideraciones de interferencia entre los eslabones del robot de tal forma que se detectan cuales son puntos que a pesar de cumplir las restricciones impuestas por la cinemática inversa incurrir en colisiones. Estos puntos son representados en por el símbolo “o”.

Se puede apreciar que las colisiones se presentan en los límites del espacio de trabajo. En la gráfica 5 (b) se muestra un ejemplo de un punto que cumple con las restricciones impuestas por la cinemática inversa pero incurrir en interferencias de varios eslabones. En la gráfica 6, se presenta el volumen del espacio de trabajo del robot excluyendo los puntos donde ocurren interferencias.

Gráfica 6. Espacio de trabajo del robot teniendo en cuenta las interferencias entre sus eslabones



Cálculo óptimo de las dimensiones del robot

Para el proceso de optimización se usaron algoritmos genéticos (GAs)

Los GAs son métodos adaptativos que se pueden usar para resolver problemas que implican optimización, funcionan imitando la adaptación y mutación de la evolución biológica, en el proceso de evolución natural. GAs inicia con una población cuyas características permiten la solución del problema, luego se compara la solución de cada uno y los individuos que producen la mejor solución (evaluados por una función de objetivo por su desempeño) sobreviven. Los genes de los individuos que sobreviven se pasan a la siguiente generación, esto acompañado de procesos de combinación y mutación permiten el desarrollo de soluciones cada vez mejores. La principal diferencia entre GAs y los métodos tradicionales de optimización radica en 4 puntos importantes (Laribi, *et al*, 2009):

- GAs busca una población de soluciones en paralelo, y no en un solo punto.
- Los algoritmos genéticos no requieren de una información derivativa que guíe el proceso, la función objetivo y el desempeño requerido determinan la dirección de búsqueda.
- GAs usa reglas de transición probabilísticas y no determinísticas.
- Genera un número de soluciones potenciales que le permiten al usuario si es necesario seleccionar la más conveniente.

En la gráfica 7 se muestra el diagrama de flujo de los algoritmos genéticos.

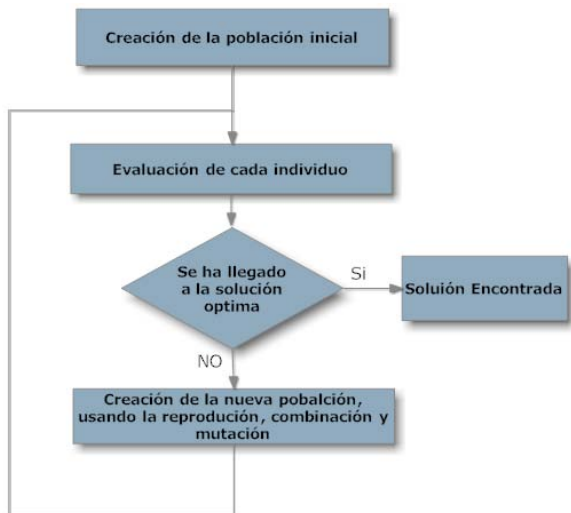
Los parámetros básicos usados en el proceso de optimización se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de cálculo para GAs

Parámetros	
Población (individuos por generación)	20
Número de generaciones	100
Taza de mutación (función Gaussiana)	0.6
Taza de recombinación	0.8

Para realizar el proceso de optimización se desarrolló un programa en Matlab®, donde la función objetivo consistió en encontrar el máximo volumen del espacio de trabajo para un rango de dimensiones de los eslabones preestablecido, los genes de cada individuo son las cuatro dimensiones principales del robot: tamaño de la plataforma fija, longitud del brazo, longitud del antebrazo y tamaño de la plataforma móvil. La búsqueda se normalizó para valores entre 1 y 100, de manera que los resultados sean escalables y extrapolables a cualquier tamaño de espacio de trabajo.

Gráfica 7. Diagrama de flujo de GAs



Resultados

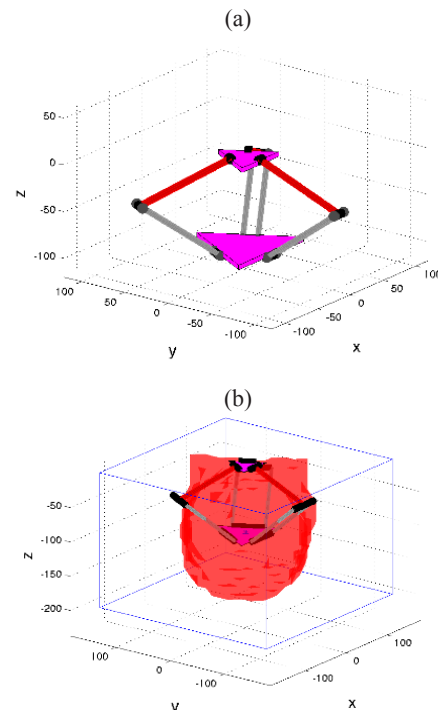
Al aplicar el algoritmo de optimización de las dimensiones del robot planteado en la sección previa, se obtuvieron los siguientes parámetros dimensionales (tabla 2).

Tabla 2. Parámetros dimensionales del robot óptimo

Parámetro	Valor
e (lado de la base)	56.0137
f (lado efector final)	99.4633
L_1 (longitud de los eslabones articulados con la base)	97.8242
L_2 (longitud de los eslabones articulados con el efector final)	99.7088

En la gráfica 8(a) se ilustra el robot con las dimensiones óptimas que maximizan el volumen del espacio de trabajo. Se puede apreciar que la magnitud del efector final resulto mayor que la de la base. Este resultado es interesante debido a que los robots industriales de este tipo poseen el efector final más pequeño que la base. Debe tenerse presente que el efector final debe tener una inercia baja para conservar las capacidades en cuanto a velocidad que caracterizan este tipo de robot, por esta razón en efector final se puede hacer agujeros (que reduzcan peso) y no necesariamente tendrá una forma triangular, basta con que las articulaciones esféricas que posee conserven la posición estipulada.

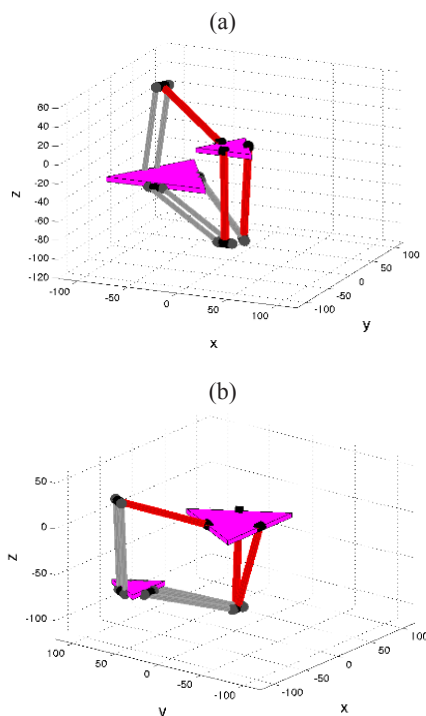
Gráfica 8. (a) Robot con las dimensiones optimas que maximizan el volumen del espacio de trabajo. (b) Volumen del espacio de trabajo del Robot con dimensiones óptimas



En la gráfica 8 (b) se puede apreciar el volumen del espacio de trabajo del robot con dimensiones óptimas. Puede observarse claramente de acuerdo con su forma que el efector final alcanza más posiciones, incluso cercanas a su base (ver la diferencia con la forma del volumen expuesto en la gráfica 6 de la cuarta sección).

Se realizó un análisis del por qué cuando la distancia de las articulaciones esféricas del efector final con respecto a su centro es mayor (con respecto a las ubicadas en la base), repercute en volúmenes de espacio de trabajo mayores. Se observó que la razón principal son las interferencias entre los eslabones. Estas interferencias usualmente ocurren cuando una de las articulaciones actuadas (rotacionales ubicadas en la base) tienen un ángulo de valor negativo y las otras dos poseen ángulos que superan los 90 grados. El hecho de tener efectores finales de mayor dimensión que la base, disminuye la necesidad que dos de las articulares rotaciones superen los 90 grados para lograr una posición deseada.

Gráfica 9. (a) Robot con dimensiones óptimas en una posición límite. (b) Interferencias de más comunes en los robot de configuración delta.



En la gráfica 9(a) se puede apreciar el robot con dimensiones óptimas en una de sus posiciones límite. Obsérvese cómo dos de las articulaciones rotacionales han girado un ángulo de aproximadamente 90 grados, sin embargo no ocurre ninguna colisión. Mientras que en la gráfica 9(b) se ilustra un robot con brazos de las mismas dimensiones, pero con un efector final más pequeño que la base del robot (robot usualmente utilizado en la industria). Se observa cómo el Robot incurriría en una interferencia entre sus eslabones para llegar a la misma posición.

Conclusiones

Las técnicas basadas en algoritmos genéticos son herramientas útiles para el cálculo de las dimensiones del robot delta con el fin de maximizar el volumen del espacio de trabajo, tal como lo demostraron los resultados obtenidos. El método del cálculo de espacio de trabajo, por medio de verificación de un número significativo de puntos, permite el análisis de otro tipo de características tales como las interferencias entre sus eslabones.

Teniendo en cuenta que la mayoría de interferencias producidas en un robot delta se derivan cuando dos de sus articulaciones actuadas superan un valor de 90 grados, se puede utilizar un efector final que separe las articulaciones rotacionales una distancia mayor que la distancia de separación de las articulaciones rotacionales ubicadas en la base, esto con el fin de aumentar significativamente el volumen del espacio de trabajo.

Otra ventaja que ofrecen estos parámetros dimensionales es que el robot podrá llegar a puntos más cercanos a su base.

Referencias

- Angel, L.; Saltaren, R.; Sebastian, J.M.; Hansson, A.; Aracil, R. (2004). Robotenis: parallel robot with visual control. IEEE. Automation Congress, Proceedings.
- Clavel, R. (1989). Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 23, Vol. 6, pp. 501-519.
- Courteille, E.; Deblaise, D.; Maurine, P. (2009). Design optimization of a Delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation. IEEE. Intelligent robots and systems.
- Dehghani, Eghesad; Safavi; Khayatian and Ahmadi, (2008) Neural network solutions for forward kinematics Problem of HEXA Parallel Robot. IEEE. American Control Conference.
- ESO, 2010. <http://www.eso.org/public/teles-instr/surveys/telescopes/vista/index.html>
- Lee, T. W.; Yan, D. C.H. (1984). Feasibility study of a platform type of Robotic Manipulator. A kinematic viewpoint. ASME J. Mechanisms, transmissions and automation in design. Vol. 106, pp. 191-198
- Lees, A; Vanrenterghem, J; Barton, G; Lake, M. (2007). Kinematic response characteristics of the CAREN moving platform system for use in posture and balance research. Med Eng Phys. 29 Vol. 5, pp. 629-35.
- Merlet, J. P. (2002). Still a long way to go on the road for parallel mechanisms. ASME Conference, Montreal, Canada.
- Merlet, J. P. (2004). Solving the forward kinematics of a Gough-Type parallel manipulator with interval analysis. The International Journal of Robotics Research, 3, Vol. 23.
- Merlet, J. P. (2006). Parallel Robots Springer
- Merlet, J. P. (2007). Direct kinematics of parallel manipulators. Journal of Robotica, Vol. 25.
- Mustafa, M.; Misuari, R.; Daniyal, H. (2008). Forward kinematics of 3 degree of freedom delta robot. IEEE. Research and Development.
- Siciliano. B.; Khatib. O. (2008). Springer Handbook of robotics. Springer - Verlag. Berlín
- Tsai, L. W. (1999). Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Wiley Interscience. John Wiley and Sons.
- Vivas, A. (2005). Robótica paralela: aplicaciones industriales, modelado y control. Universidad del Cauca. Popayán.
- Vivas, A. y P. Poignet (2006). Control predictivo de un robot paralelo. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 3, Vol. 4, pp.45-52.

Sobre los Autores

Edison Martínez

Profesor de la Universidad de Pamplona, candidato a magister en controles industriales (Universidad de Pamplona). Ingeniero mecánico (Universidad Industrial de Santander).

César Augusto Peña

Profesor de la Universidad de Pamplona, Ph.D en Automática y Robótica (Universidad Politécnica de Madrid). Magister en ingeniería electrónica y de

computadores (Universidad de los Andes). Ingeniero electromecánico (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia)

Eugenio Yime

Profesor de la Universidad Tecnológica de Bolívar, Ph.D. en Automática y Robótica (Universidad Politécnica de Madrid). Magister en ingeniería mecánica (Universidad de los Andes). Ingeniero mecánico (Universidad del Norte).

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.