

Análisis cinemático y simulación de un robot paralelo de estructura 6-RSS

Vázquez Gonzalez José Luis¹
Cisneros Limón Rafael¹
Mendoza Vázquez Rafael²
Alejos Palomares Rubén¹

¹ Universidad de las Américas, Puebla,

² Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica
MÉXICO.

correo electrónico: rafaexero@hotmail.com
jorameva@inaoep.mx
josel.vazquez@udlap.mx

Recibido el 12 de junio de 2006; aceptado el 6 de noviembre de 2006.

1. Resumen

Los robots paralelos, a diferencia de los seriales, reparten la carga soportada entre varios brazos logrando así un sistema más ligero, lo cual reduce su inercia, permite un mejor control y demanda menos potencia por parte de los actuadores. Así mismo, la documentación es escasa, siendo la estructura paralela más comúnmente analizada la Stewart-Gough. El robot bajo estudio difiere de dicha estructura en sus articulaciones, y por tanto, en sus características de movimiento y los métodos de análisis aplicables. Surge entonces la necesidad de derivar su modelo matemático. Este artículo propone una solución geométrica simple al problema cinemático inverso, un sistema de ecuaciones no lineales 6x6 que resuelve el problema cinemático directo y una expresión matemática que define el espacio de trabajo del robot, con la finalidad de graficarlo como volumen en tercera dimensión.

Palabras clave: robot paralelo, análisis cinemática, simulación cinemática.

2. Abstract

Parallel robots, unlike serial ones, distribute the load applied to the end effector on several arms, therefore the system becomes lighter, which indeed diminishes inertia, allows a better control and demands less power from the actuators. Furthermore, documentation

for these robots is limited making Stewart-Gough parallel structure the most commonly analyzed. The robot under study differs from this structure in the nature of its joints, and in consequence, in the properties of its motion and in the applicable analysis methods. Comes then the necessity to derive its mathematical model. This article suggests a simple geometric solution to the inverse kinematics problem, a non linear 6x6 system of equations that solves the direct kinematics problem and a mathematical expression that describes the robot's workspace with the purpose of graphing it as a third dimension volume.

Key words: Parallel Robot, Kinematics Modeling, Kinematics Simulation.

3. Introducción

El presente trabajo consiste en el análisis cinemático y simulación de un robot paralelo de estructura 6-RSS. Consta de una base, una plataforma y seis brazos constituidos cada uno por dos eslabones: uno de entrada y otro de acoplamiento, siendo sus longitudes referidas de ahora en adelante como P y L , respectivamente. Cada brazo posee una estructura RSS; es decir, que entre los eslabones y con la plataforma la conexión se realiza mediante articulaciones esféricas (S), mientras que la articulación que interconecta con la base es rotacional (R), denotándose su variable articular asociada como θ_i . Para ello, tanto base como plataforma se definen como formas geométricas hexagonales, cada una formada por una arista mayor y una arista menor (ver Fig. 1).

4. Geometría del robot en paralelo

A. Base

La forma hexagonal que define la base se encuentra descrita mediante dos magnitudes correspondientes al tamaño de una arista mayor (b) y una arista menor (d). Este hexágono se encuentra tanto inscrito como circunscrito en círculos concéntricos, coincidiendo su centro con el centroide del hexágono. Si el origen de un sistema coordenado unido a la base se localiza en dicho centroide, mediante geometría y trigonometría se puede demostrar que los correspondientes vértices (\mathbf{B}_i) se ubican en función de b y d según la Fig. 2.

B. Plataforma

En cuanto a la forma geométrica de la plataforma se sabe que es semejante a la de la base, siendo la única diferencia entre

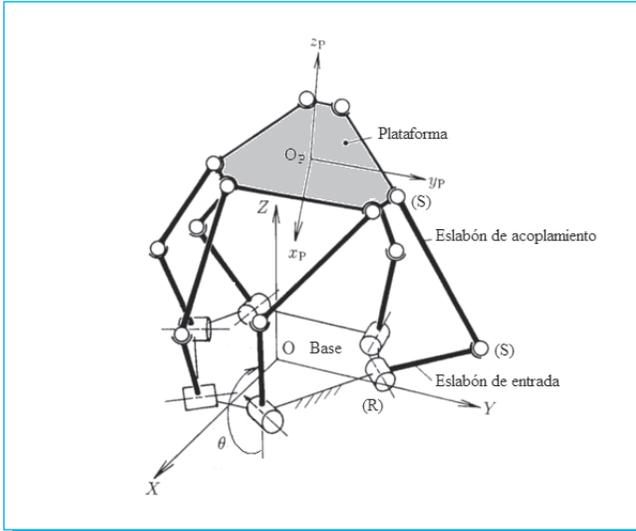


Fig. 1. Robot paralelo de estructura 6-RSS [1].

las dos la manera en que se define la orientación sobre su propio sistema de coordenadas. Para este hexágono se denota la magnitud de la arista mayor como a y la de la arista menor como c . De esta manera, los correspondientes vértices (t_i) se ubican en función de a y c según la Fig. 3.

C. Relación de transformación

El sistema coordenado de la base se toma como el sistema coordenado de referencia para el robot y se denota como $\{U\}$. La orientación de la plataforma se define respecto a $\{U\}$ mediante tres ángulos los cuales se escogen de manera que

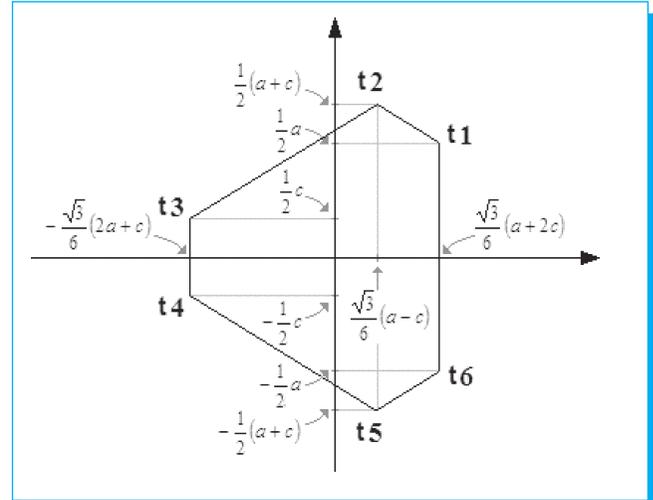


Fig. 3. Ubicación de los seis vértices del hexágono de la plataforma.

tengan un sentido físico: el ángulo α representa el ángulo que la plataforma ha rotado sobre el eje X fijo mientras que el ángulo β lo hace pero sobre el eje Y fijo. El ángulo γ representa entonces el ángulo que la plataforma, ya orientada con α y β , gira en torno a su vector normal. Otra manera de visualizar estos ángulos es mediante la Fig. 4 en la que un vector unitario es orientado mediante α y β , y sobre el se gira un ángulo α .

La matriz de rotación asociada a la definición de los ángulos anteriores se puede obtener a partir de su definición:

$$R_{\alpha,\beta,\gamma} = [R_{Y,\beta} \cdot R_{X,\alpha}] \cdot R_{Z,\gamma} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

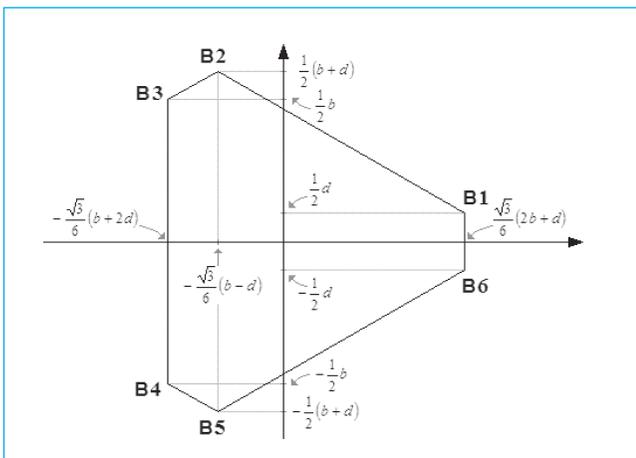


Fig. 2. Ubicación de los seis vértices del hexágono de la base.

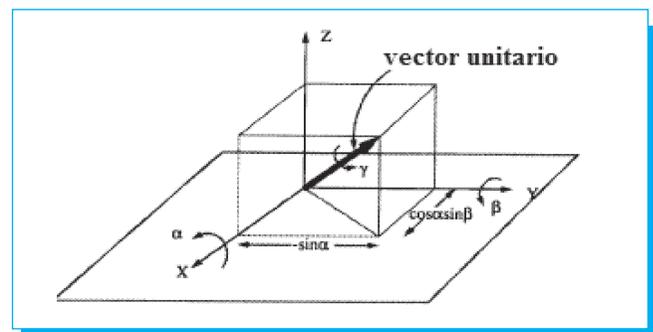


Fig. 4. Definición de los ángulos α , β y γ para la orientación de la plataforma [2].

donde:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \cos\beta\cos\gamma + \text{sen}\alpha\text{sen}\beta\text{sen}\gamma \\ R_{12} &= -\cos\beta\text{sen}\gamma + \text{sen}\alpha\text{sen}\beta\text{sen}\gamma \\ R_{13} &= \cos\alpha\text{sen}\beta \\ R_{21} &= \cos\alpha\text{sen}\gamma \\ R_{22} &= \cos\alpha\cos\gamma \\ R_{23} &= -\text{sen}\alpha \\ R_{31} &= -\text{sen}\beta\cos\gamma + \text{sen}\alpha\cos\beta\text{sen}\gamma \\ R_{32} &= \text{sen}\beta\text{sen}\gamma + \text{sen}\alpha\cos\beta\cos\gamma \\ R_{33} &= \cos\alpha\cos\beta \end{aligned}$$

La matriz de transformación homogénea se forma a partir de la matriz de rotación anterior y el vector de posición \mathbf{p} del centroide de la plataforma definido en $\{U\}$:

$${}_{\text{TOP}}\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

Así, mediante (3) se pueden calcular las coordenadas de los vértices de la plataforma (\mathbf{T}_i) sobre $\{U\}$ dada una localización (posición y orientación) deseada.

5. Cinemática inversa

Se propone un modelo simplificado que permita una primera aproximación a la abstracción del problema en el cual se ubica el vértice de la base, unido a un extremo del eslabón de entrada P , en el origen (\mathbf{B}_i) de un sistema de coordenadas $\{A_i\}$, como se muestra en la Fig. 5.

En dicha figura se muestra cada vértice \mathbf{T}_i de la plataforma, al cual se encuentra unido el eslabón de acoplamiento L . La distancia entre este último punto y el origen \mathbf{B}_i de $\{A_i\}$ se denomina como W_i . Así mismo, en dicha figura además se define \mathbf{Q}_i , el cual representa el punto de unión entre los eslabones P y L .

Cabe resaltar que el tipo de articulación existente en \mathbf{B}_i , \mathbf{Q}_i y \mathbf{T}_i determina algunas propiedades geométricas de dichos puntos: en \mathbf{B}_i se encuentra una articulación rotacional, siendo θ_i definido partiendo del eje negativo de Z (0° sobre dicho eje), de tal forma que \mathbf{Q}_i , a una distancia P de \mathbf{B}_i , puede recorrer un círculo de radio P sobre el plano YZ . Luego, en \mathbf{Q}_i se encuentra una articulación esférica, por lo que \mathbf{T}_i , a una distancia L de \mathbf{Q}_i , puede recorrer una esfera de radio L .

No obstante, sólo tres puntos se encuentran involucrados, formando las tres líneas P , L y W_i un triángulo; es decir, que el problema puede ser tratado en dos dimensiones: el triángulo $\mathbf{B}_i\mathbf{Q}_i\mathbf{T}_i$ es un triángulo no rectángulo, por lo que para relacionar sus lados y ángulos se usa la ley de cosenos junto con la definición del ángulo ϕ_i , el cual también se encuentra

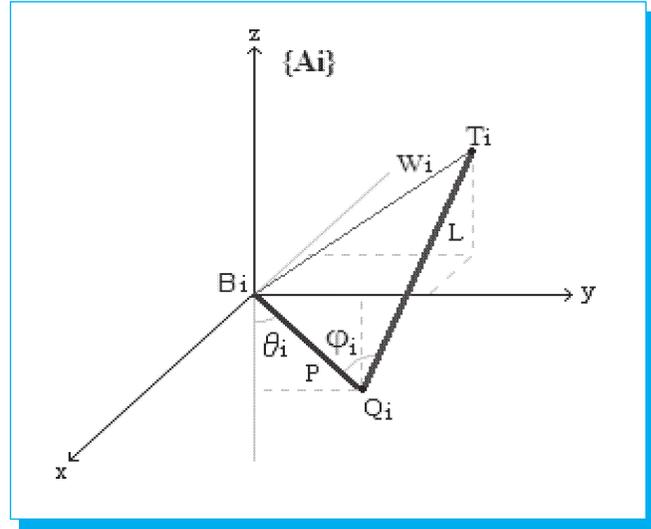


Fig. 5. Sistema de coordenadas $\{A_i\}$, para cada brazo del robot.

indicado en la Fig. 5. Dicho ángulo puede obtenerse de la definición de producto punto. Para ello se definen los vectores \mathbf{P}_i y \mathbf{L}_i tal que ambos parten de \mathbf{Q}_i . Así, es posible calcular W_i mediante la siguiente expresión:

$$W_i = \sqrt{P^2 + L^2 - 2(\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{L}_i)}$$

Cada sistema coordenado $\{A_i\}$ se encuentra localizado o referido respecto a $\{U\}$ como se muestra en la Fig. 6, trasladado a cada vértice de la base y orientado según un ángulo σ_i de tal manera que cada eje X quede orientado según el eje de cada articulación rotacional.

Así, los vectores de interés quedan definidos como:

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} -P\text{sen}\theta_i \cos\sigma_i + B_{iy} \\ P\text{sen}\theta_i \cos\sigma_i + B_{iy} \\ -P\cos\theta_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{B}_i - \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} P\text{sen}\theta_i \sin\sigma_i \\ -P\text{sen}\theta_i \cos\sigma_i \\ -P\cos\theta_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{T}_i - \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} T_{ix} + P\text{sen}\theta_i \sin\sigma_i - B_{ix} \\ T_{iy} - P\text{sen}\theta_i \cos\sigma_i - B_{iy} \\ T_{iz} + P\cos\theta_i \end{bmatrix}$$

Tal y como fueron definidos los vectores \mathbf{P}_i y \mathbf{L}_i en $\{U\}$, la expresión (4) puede ser rescrita como:

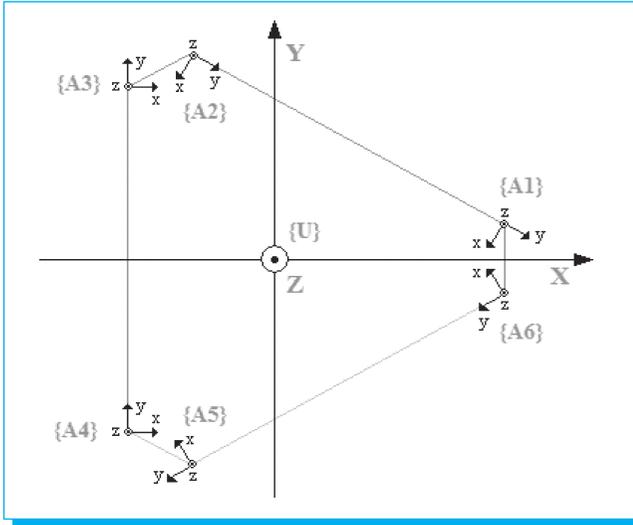


Fig. 6. Sistemas de coordenadas $\{A_i\}$ trasladados a los vértices de la base.

$$W_i = \sqrt{\begin{matrix} L^2 - P^2 - 2P\cos\theta_i(T_{iz}) \\ -2P\sin\theta_i \begin{bmatrix} \sin\sigma_i(T_{ix} - B_{ix}) \\ -\cos\sigma_i(T_{iy} - B_{iy}) \end{bmatrix} \end{matrix}}$$

De la misma forma, W_i también está definido mediante la norma de T_i :

$$W_i = \|T_i\| = \sqrt{(T_{ix} - B_{ix})^2 + (T_{iy} - B_{iy})^2 + T_{iz}^2}$$

Entonces se igualan (8) y (9) para encontrar la ecuación para cada brazo del robot, quedando:

$$\begin{aligned} -2P\sin\theta_i \begin{bmatrix} \sin\sigma_i(T_{ix} - B_{ix}) \\ -\cos\sigma_i(T_{iy} - B_{iy}) \end{bmatrix} + 2P\cos\theta_i(T_{iz}) &= \\ = L^2 - P^2 - (T_{ix} - B_{ix})^2 - (T_{iy} - B_{iy})^2 - T_{iz}^2 & \end{aligned}$$

Se definen las siguientes constantes a partir de (10):

$$\begin{aligned} A_i &= 2P(\sin\sigma_i(T_{ix} - B_{ix}) - \cos\sigma_i(T_{iy} - B_{iy})) \\ B_i &= 2P(T_{iz}) \\ C_i &= L^2 - P^2 - (T_{ix} - B_{ix})^2 - (T_{iy} - B_{iy})^2 - T_{iz}^2 \end{aligned}$$

Así, (10) puede ser rescrita como:

$$A_i \sin\theta_i + B_i \cos\theta_i = C_i$$

Pero también (14) puede quedar expresada como:

$$\sqrt{A_i^2 + B_i^2} \cos(\theta_i - \tan^{-1} \frac{A_i}{B_i}) = C_i$$

De donde se despeja la variable articular θ_i , obteniéndose dos soluciones válidas para cada localización de la plataforma:

$$\theta_i = \pm \cos^{-1} \left[\frac{C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \right] + \tan^{-1} \frac{A_i}{B_i}$$

6. Cinemática directa

De la magnitud del vector L_i definido en $\{U\}$ se puede obtener la siguiente ecuación:

$$L^2 = \begin{bmatrix} (T_{ix} + P\sin\theta_i \sin\sigma_i - B_{ix})^2 + \\ (T_{iy} + P\sin\theta_i \cos\sigma_i - B_{iy})^2 + (T_{iz} + P\cos\theta_i)^2 \end{bmatrix}$$

Al escribir (17) para cada uno de los seis brazos se forma un sistema de ecuaciones no lineales 6x6 pues T_i está referido a la posición y orientación de la plataforma; es decir, hay seis incógnitas: $p_x, p_y, p_z, \alpha, \beta, \gamma$; Dicho sistema de ecuaciones no lineales representa el modelo cinemático directo completo del sistema; sin embargo, no posee una solución cerrada por lo que fue resuelto mediante métodos numéricos, específicamente el método de Newton-Raphson multivariable.

7. Espacio de trabajo

Se considera la expresión para la cinemática inversa del robot reportada en (16). Existe solución para esta ecuación cuando para el ángulo de interés se obtienen resultados reales.

El dominio de $\tan^{-1}(x)$ son todos los números reales, no así el de $\cos^{-1}(x)$, en el que el dominio de la función se encuentra acotado entre -1 y 1 . Es decir, que la función que restringe los valores que deben adoptar las constantes A_i, B_i y C_i en (16) es precisamente la de $\cos^{-1}(x)$. Aprovechando este hecho es posible derivar la expresión para el espacio de trabajo:

$$\begin{aligned} -1 &\leq \frac{C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \leq 1 \\ C_i^2 - A_i^2 - B_i^2 &\leq 0 \end{aligned}$$

Así, para saber si una localización para la plataforma es válida dentro del espacio de trabajo basta con sustituir valores en la expresión anterior para cada brazo del robot y verificar que la desigualdad se cumpla en todos los casos.

De igual forma, (18) puede considerarse la definición de un volumen característico para cada orientación de la plataforma, siendo la superficie que lo envuelve la frontera del espacio de trabajo correspondiente a cada brazo, la cual queda definida por la función implícita f_i :

$$f_i = C_i^2 - A_i^2 - B_i^2 = 0$$

El volumen que representa el espacio de trabajo total de la plataforma resulta de la intersección del volumen correspondiente al espacio de trabajo para cada brazo, siendo necesaria para su representación la utilización de la llamada Geometría Sólida Constructiva (CSG, del inglés *Constructive Solid Geometry*). Ésta se usa para construir objetos complejos a partir de otros más primitivos como cubos, esferas, cilindros y conos mediante operaciones de teoría de conjuntos: unión, intersección y substracción.

Las superficies implícitas generalizan esta idea al representar objetos a partir de su función implícita y mediante la definición de operaciones de teoría de conjuntos como parte de la función. Esto último se puede lograr de varias maneras, siendo una de ellas el método Ricci, donde las operaciones unión e intersección se implementan como [3]:

$$f_1 \cup f_2 = \text{mín}(f_1, f_2)$$

$$f_1 \cap f_2 = \text{máx}(f_1, f_2)$$

De esta forma, la superficie que envuelve la frontera del espacio de trabajo de la plataforma está definida mediante la siguiente función, que hace uso de (19):

$$f_p = \text{máx}(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$$

Para graficar el espacio de trabajo como volumen en tercera dimensión para cada orientación de la plataforma debe considerarse que una función implícita representa una condición algebraica en la cual la variable de interés no se encuentra definida explícitamente generalmente debido a que no se puede despejar. Por lo tanto, los puntos que definen una superficie implícita no se pueden encontrar de manera directa, requiriéndose así un proceso de poligonización para poder graficar la superficie que envuelve dicho volumen.

La poligonización consiste en un muestreo del espacio tridimensional en búsqueda de puntos que formen parte de la superficie o se encuentren cercanos a ella, de tal forma que se pueda definir un conjunto de polígonos el cual aproxime la forma real de la superficie implícita.

Existen varios algoritmos para efectuar la poligonización de una superficie implícita. El más sencillo de ellos consiste en

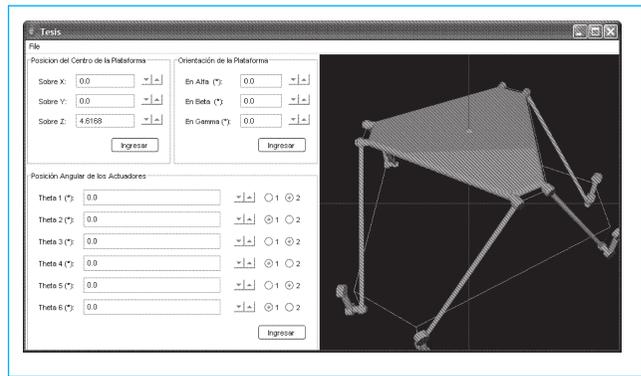


Fig. 7. Interfaz visual del simulador.

subdividir una porción del espacio tridimensional en cubos, evaluar cada vértice y determinar si la superficie cruza el cubo y por dónde. Hecho esto se aproximan los vértices de los polígonos y se arreglan en una estructura de datos. De esta manera, mientras más se subdivide la porción del espacio

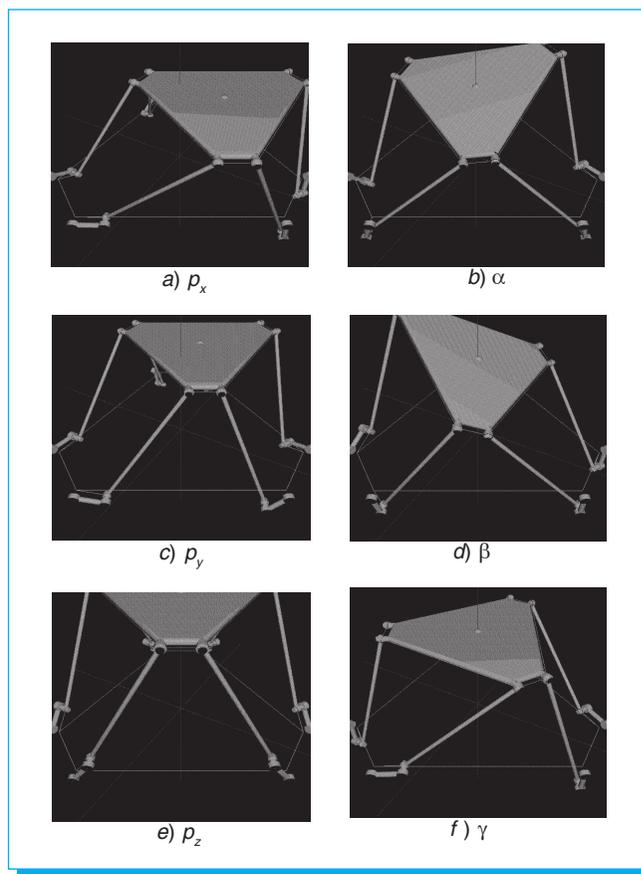


Fig. 8. Variación de los parámetros de localización.

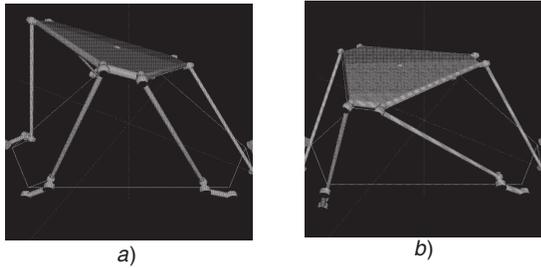


Fig. 9. Variación de las variables articulares.

tridimensional mejor se aproxima la superficie implícita. Sin embargo, aumentar el número de subdivisiones del espacio tridimensional incrementa el tiempo de cómputo de manera exponencial, haciendo ineficiente este método.

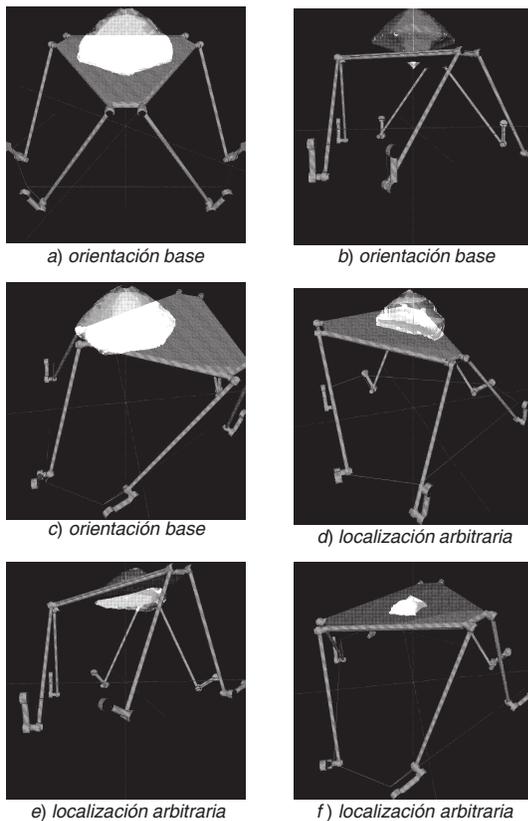


Fig. 10. Graficación del espacio de trabajo.

Otro algoritmo, denominado como poligonización adaptiva y usado en este trabajo, se presenta y describe a detalle en [4]. A grandes rasgos este algoritmo consta de dos fases: una de muestreo burdo y otra de refinamiento adaptivo. Durante la primera fase se efectúa una poligonización simple considerando pocas subdivisiones del espacio tridimensional. La fase de refinamiento adaptivo consiste en evaluar recursivamente el gradiente sobre los vértices de cada polígono para determinar la normal a la superficie en dicho punto. Si el ángulo entre la normal de dos vértices conectados es mayor a un ángulo de tolerancia entonces se considera que la arista del polígono no modela de manera correcta la curvatura de la superficie, por lo que el polígono se subdivide y los vértices generados se proyectan sobre la superficie.

8. Pruebas obtenidas a partir del simulador desarrollado

Para validar los resultados obtenidos a lo largo del artículo se desarrolló un simulador en 3D del robot basado en la plataforma Java® en conjunto con OpenGL® y controlado mediante un Joystick (Fig. 7). Dicho simulador permite aplicar y visualizar el análisis cinemático para la localización de la plataforma de acuerdo a los parámetros indicados por el usuario en sentido directo e inverso, así como graficar un volumen tridimensional translúcido para cada orientación de la plataforma que representa el espacio de trabajo.

A continuación se muestran una serie de imágenes que hacen referencia a las capacidades implementadas en el simulador desarrollado. En la Fig. 8 se hace una demostración de la cinemática inversa para la cual se han variado individualmente los seis parámetros de localización con respecto a la Fig. 7. En la Fig. 9 se muestran localizaciones arbitrarias generadas a partir de variar individualmente las variables articulares; es decir, se hace una demostración de la cinemática directa. En la Fig. 10 se muestra el espacio de trabajo generado a partir de la orientación base ($\alpha = \beta = \gamma = 0^\circ$) para tres distintas posiciones del robot. Además se muestra el espacio de trabajo generado para tres localizaciones arbitrarias:

9. Conclusiones

La relación de localización puede tratarse mediante cinemática inversa y directa. La primera representa un análisis simple y eficaz mientras que la segunda se resuelve mediante métodos numéricos y no es eficaz computacionalmente hablando. Sin embargo, sólo se requiere de agilidad computacional durante el control de lazo cerrado, en el cual se emplea cinemática inversa. La cinemática directa se usa en simulaciones, donde la eficiencia requerida no es crítica.

El espacio de trabajo corresponde a una medida para caracterizar el rango de movimientos que se pueden realizar y compararlo con el tamaño o la robustez del robot, pero también es útil determinarlo debido a que fuera de él se hacen presentes números imaginarios en los resultados obtenidos para la localización, o singularidades que resultan en errores de cómputo. Es útil en la forma de desigualdad, ya que mediante una simple sustitución de valores es posible determinar si la configuración deseada es válida o no. Sin embargo, también es útil visualizarlo como un volumen en tercera dimensión, delimitado por una superficie que representa su frontera, adquiriendo así un sentido más tangible. La expresión desarrollada permite obtener el espacio de trabajo de cualquier implementación de la estructura analizada, así como su volumen tridimensional característico para cada orientación.

En resumen, se describió de manera completa la relación cinemática de localización para esta estructura paralela en particular, de manera inversa y directa, así como la porción del espacio donde dicha relación tiene validez.

10. Referencias

- [1] Takeda Yukio, Funabashi Hiroaki, Kimura Masafumi & Hirose Kazuya. «6-RSS Type Spatial In-Parallel Actuated Mechanism with Six Degrees of Freedom» [en línea]. Tokyo, Department of Mechanical Engineering and Science: Tokyo Institute of Technology, 1998. Disponible en: [http://www.mech.titech.ac.jp/~msd/6-RSS\(1998\).htm](http://www.mech.titech.ac.jp/~msd/6-RSS(1998).htm)
- [2] Liu Kai, Fitzgerald John M. & Lewis Frank L. «Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator». IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 2. Texas, Automation & Robotics Research Institute, University of Texas, 1993.
- [3] Stolte Nilo & Kaufman Arie. «Discrete Implicit Surface Models using Interval Arithmetics». U.S.A., Visualization Laboratory, Computer Science Department, State University of New York at Stony Brook.
- [4] Luiz Velho. «Simple and Efficient Polygonization of Implicit Surfaces». Rio de Janeiro, Instituto de Matemática Pura e Aplicada.

DIGITAL DOT

SERVICIOS

DIGITALES

ELECTRÓNICOS

INTEGRALES

Producción y posproducción
en audio y video

Centenario 3, Col. Del Carmen,
Coyoacán, México, DF.
5339 5880, 5339 5474

Reseña del libro *Trolebús con motor de corriente alterna*

A. S. Balankin

El transporte en la Ciudad de México es un sector muy importante que tiene una alta demanda por los usuarios. De ahí que tenga que satisfacer diversos requisitos, siendo algunos de ellos que sea: masivo, seguro, confiable, con alta disponibilidad y con bajo nivel de contaminación. Bajo este contexto, el Gobierno del Distrito Federal, a través del Sistema del Transporte Eléctrico (STE), adquirió 200 trolebuses nuevos, los cuales tienen motores de corriente alterna, controlados con un sistema electrónico de potencia y control digital de alta tecnología.

Estos trolebuses fueron fabricados en México y para certificar las pruebas de recepción se firmó un acuerdo de colaboración entre el STE y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en 1998. Para este efecto, la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) designó a un equipo de especialistas en las áreas tecnológicas afines. Ellos trabajaron durante un par de años.

El libro *Trolebús con motor de corriente alterna* [1] recoge la experiencia acumulada en dicho proceso de certificación. Todo esto a partir de la realización de las especificaciones, el seguimiento del diseño y la manufactura, así como la certificación de las pruebas estáticas y dinámicas del comportamiento de los trolebuses serie 9000 que están circulando actualmente en la Ciudad de México. De acuerdo a lo anterior, el lector encontrará una descripción de las partes constitutivas del trolebús y de aquellos aspectos teóricos requeridos para su mejor comprensión.

La organización editorial estuvo a cargo de Alfredo Nava Segura y Guillermo Urriolagoitia Calderón, que a su vez coordinaron el desarrollo de este proyecto de certificación, mientras que los capítulos fueron realizados por los líderes de grupo que participaron en este proyecto. En términos generales, esta obra puede ser dividida en tres partes. En la primera, que es en sí el primer capítulo, el libro trata sobre las generalidades del transporte en la Ciudad de México, analizando su evolución histórica, haciendo énfasis en el desarrollo del transporte eléctrico. Esto fue realizado por: G. Urriolagoitia Calderón, L. H. Hernández Gómez, G. Villa y Rabasa y R. Ibarra.

La segunda parte, la conforman los siguientes seis capítulos. El lector encontrará que cada uno de éstos ha sido estructurado en las mismas partes en que el trolebús fue dividido para su certificación. Esto es, en el capítulo dos se examina el sistema carrocería del trolebús. Para este efecto, se establecen sus funciones, requerimientos y dimensiones. Además, se describen los subsistemas que lo componen: chasis, estructura, iluminación, habitáculo, área del conductor, ventanillas y cristales, parabrisas y medallón, aislamiento térmico y sonoro, defensas, accesorios e iluminación exterior. Este capítulo es presentado por L. H. Hernández Gómez, G. Urriolagoitia Calderón y E. A. Merchán Cruz.

El tercer capítulo, desarrollado por G. Urriolagoitia Calderón y J. C. Gómez Mancilla, está relacionado con el sistema mecánico, en donde se hace su descripción y se indica su funcionamiento. Asimismo, se explican los subsistemas considerados, siendo éstos: el eje delantero y su suspen-

sión; eje trasero, suspensión, diferencial y flecha cardán; dirección; y frenos. Además se habla sobre la verificación de sistema mecánico integrado, el diagnóstico de fallas más comunes y la inspección de este sistema. El sistema neumático se trata en el cuarto capítulo. Este es un sistema que se requiere para operar diversos sistemas del trolebús, tal es el caso de la apertura y cierre de puertas, la dirección, los frenos, arrodillamiento y suspensión. Específicamente, el sistema de frenos se describe ampliamente y se detallan las fallas más comunes y los métodos que existen para su predicción. Éste fue escrito por F. Sánchez Silva, V. Zurita Ugalde e I. Carvajal Mariscal.

El sistema de alta tensión se describe en el quinto capítulo. Este es presentado por J. Rodríguez, M. Arias y P. Ponce. Los aspectos que tratan están relacionados con los transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT), los métodos de control del inversor, la modulación senoidal del ancho de los pulsos en el inversor VVVF, la operación del motor de inducción del trolebús y el comportamiento dinámico del trolebús.

El sistema eléctrico de baja tensión es analizado en el sexto capítulo por A. Nava. Para este efecto, se analizan las características y especificaciones generales del convertidor estático. Además, se hace la descripción del circuito de potencia, los circuitos de protección y los circuitos de control. Asimismo, se detalla su operación y la detección de fallas.

El séptimo capítulo, R. Cortés, D. Libreros, F. Hurtado y M. Nango lo enfocan al Módulo Inteligente de Control Digital. En este contexto tratan aspectos relacionados con este punto, tales como: la arquitectura, la unidad central de procesamiento, el control, los modos de direccionamiento, los temporizadores, los algoritmos de control, entre otras cosas, así como el monitoreo, diagnóstico y reportes de falla.

La tercera parte, que está constituida por el último capítulo, el cual ha sido orientado por G. Urriolagoitia Calderón y A. Nava Segura a la Certificación de las Pruebas de Recepción de Trolebuses. En este caso se sintetiza el proceso de certificación. Además, se habla sobre los reportes de certificación y se presenta la relación de los parámetros de certificación. En términos generales, se certificaron más de 1200 parámetros del trolebús. Para este efecto, se revisaron los procedimientos de las pruebas de prototipo y serie y sus criterios de aceptación y se les dio seguimiento a dichas pruebas.

Es importante indicarle al lector que esta obra sintetiza los esfuerzos de desarrollo tecnológico de las empresas Mitsubishi Electric Corporation, GEC Alstom y Mexicana de Autobuses, quienes diseñaron y construyeron los 200 trolebuses, serie 9000.

Finalmente, se debe destacar que fue aprovechado en un 100% la infraestructura en cuanto a la manufactura disponible en el país y que el proceso de certificación llevado a cabo por la ESIME se realizó totalmente por ingenieros y técnicos mexicanos.

Referencia

[1] A. Nava-Segura y G. Urriolagoitia-Calderón, *Trolebús con motor de corriente alterna*, SEP-IPN, (2007).