



Análisis Cinemático y Control Articular Aplicado a Simulador de Movimiento de Estructura Paralela

Eduardo Izaguirre,
Luis Hernández,
Ernesto Rubio,
Pablo J. Prieto,
Orlando Urquijo

RESUMEN / ABSTRACT

En este artículo se realiza el modelado cinemático, y control articular de un robot de estructura paralela de 3 grados de libertad que se utiliza como simulador de movimiento. Dicho robot es accionado por cilindros neumáticos. El modelo basado en relaciones cinemáticas se valida mediante técnicas de simulación y posteriormente se emplea para generar los valores deseados de las variables articulares, implementándose con ello un esquema de control de posición en el espacio articular. Se muestran los resultados obtenidos de la simulación y se comprueban los mismos con las pruebas experimentales efectuadas, demostrándose la validez de las ecuaciones del modelo y el comportamiento adecuado del sistema robótico bajo el esquema de control de posición propuesto.

Palabras claves: Control articular desacoplado, modelo cinemático, plataforma de movimiento, robot paralelo.

In this paper the kinematics model and joint control of three degree of freedom parallel robot is done. The robot is used as motion simulator and it's actuated by pneumatic cylinders. The model based on kinematics relations is validated by simulation procedures and subsequently is used to obtain the desired values of joints variables in order to implement the position control scheme in joint space. The results of simulation are shown and they are proved by experiments, so the validity of the kinematics model is demonstrated as well the adequate performance of the system according to the position control scheme proposed.

Key words: Decoupled joint control, inverse kinematics model, motion platform, parallel robot.

Kinematics Analysis and Joint Control applied to Motion Simulator of Parallel Structure

INTRODUCCION

Las aplicaciones de los robots de estructura paralela se han incrementado notablemente en los últimos años¹ y aparejado a ello han aumentado los estudios relacionados con los esquemas de control más apropiados para gobernar tales sistemas²⁻⁴. Dadas sus ventajas como velocidad de operación, pequeños errores de posicionamiento, y excelente relación peso-carga a manipular, estos robots han hecho presente su hegemonía en aplicaciones médicas, simuladores de conducción, máquinas herramientas, posicionamiento de dispositivos, entretenimiento, etc³⁻⁵.

Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica que une la base fija con el elemento terminal está compuesta por dos o más cadenas cinemáticas cerradas^{1,5}. Dada la complejidad de este tipo de estructuras, se dificulta el modelado cinemático y dinámico⁶⁻⁸; así como la exigencia en los esquemas de control para garantizar el adecuado comportamiento del sistema^{2,3,9}.

El objetivo de este trabajo consiste en la obtención y validación del sistema de ecuaciones que describe el comportamiento cinemático de un robot paralelo de tres grados de libertad, con el fin de emplear dichas expresiones para implementar un esquema de control de posición en el espacio articular y con ello garantizar la operación del sistema bajo los requisitos de diseño exigidos.

Las expresiones cinemáticas se encargan de relacionar el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia, sin considerar las fuerzas o pares involucrados en el mismo, lográndose una relación analítica entre las funciones que definen el movimiento articular y las que describen la pose del elemento terminal en el espacio de tareas^{1,6}. En particular las ecuaciones de la cinemática inversa en robots paralelos presentan un carácter acoplado y a pesar de su no linealidad, resultan de gran utilidad para implementar esquemas de control de posición y de seguimiento de trayectoria^{3,9}. En este sentido se establecen dos formulaciones básicas: el problema cinemático directo, presente cuando resulta necesario conocer la pose que adquiere la plataforma móvil a partir de conocidas las variables articulares actuadas, y el problema cinemático inverso cuando las variables conocidas son la posición y orientación del elemento terminal y las incógnitas son las coordenadas articulares del robot^{10,12}.

El presente trabajo está dividido en 5 secciones, luego de la sección primera correspondiente a la introducción, se procede a realizar el análisis cinemático del robot, donde se enuncian las principales características del mismo, así como se obtiene el modelo cinemático inverso, el cual es debidamente validado mediante técnicas de simulación. En el epígrafe tercero se plantea el control articular basado en las relaciones cinemáticas inversa, para posteriormente en la cuarta sección proceder a mostrar los resultados de las pruebas experimentales y finalmente terminar con las conclusiones del artículo que se enuncian en la quinta y última sección.

ANÁLISIS CINEMÁTICO

Definiendo q como el vector de coordenadas articulares del robot y x como el vector que describe la posición y orientación del elemento terminal, tenemos que para un robot de n grados de libertad (gdl), los denominados problemas cinemático directo e inverso pueden ser expresados por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente^{13,14}.

$$[x, y, z, \theta, \varphi, \psi]^T = x = g(q_1, q_2, \dots, q_i) \quad (1)$$

$$[q_1, q_2, \dots, q_i]^T = q = f(x, y, z, \theta, \varphi, \psi) \quad (2)$$

Las relaciones cinemáticas son de gran interés para el estudio del espacio de trabajo, singularidades, etc., así como también para la concepción de esquemas de control de posición y trayectoria¹⁰.

El caso de estudio consiste en un robot paralelo de 3 gdl (ver figura 1), el cual presenta un carácter altamente acoplado. La aplicación constituye un simulador de movimiento, donde la pose deseada de la plataforma móvil es dada en el espacio de tareas; luego es necesario transformar las variables en el espacio cartesiano a los correspondientes valores articulares mediante las ecuaciones de la cinemática inversa y gracias a ello poder implementar un control desacoplado articular, donde, controlando la posición de cada actuador por separado se tendrá el efecto deseado sobre la pose del elemento terminal.

Acerca del estudio de dicho robot, existen trabajos anteriores relacionados con el modelado cinemático y simulación empleando Virtual Robot¹⁵. No obstante para bajar el centro de masa del robot y mejorar estabilidad mecánica se modifica su estructura mecánica, siendo necesario replantear el estudio cinemático y control bajo estas nuevas consideraciones.

Los movimientos que experimenta la plataforma móvil son para el cabeceo ± 17 grados y para el ladeo ± 18 grados, mientras que la altura sufre variaciones de ± 215 mm a partir de la altura media (1285 mm), según se indica en la figura 2

La estructura robótica es capaz de simular escenarios virtuales que son visualizados en un monitor ubicado en el interior de una cabina que con capacidad para dos personas, descansa debidamente soportada sobre la plataforma móvil.



Figura 1. Plataforma neumática de estructura paralela fabricada por la empresa SIMPRO.

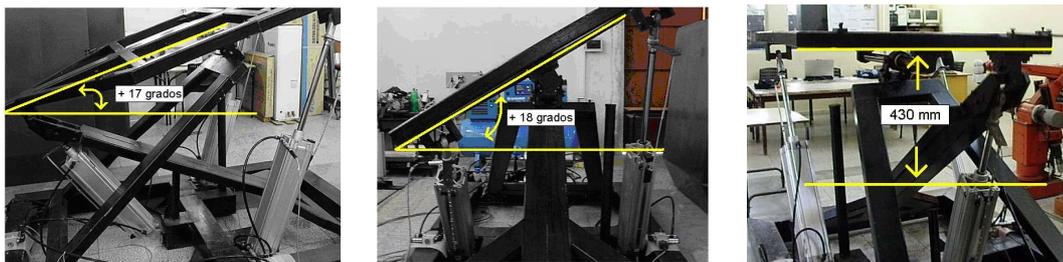


Figura 2. Representación de los ángulos máximos de cabeceo, ladeo y altura de la plataforma móvil.

Modelado Cinemático

Para desarrollar el modelo cinemático inverso se emplea la formulación vectorial, método analítico muy intuitivo, que permite mediante procedimiento geométrico desarrollar un sistema de ecuaciones cinemáticas con igual cantidad de ecuaciones que de incógnitas¹⁰. En este sentido se emplean las variables y nomenclatura definidas en la figura 3-(a). Los movimientos de ladeo (rotación alrededor del eje x'), cabeceo (rotación alrededor del eje y') y elevación (desplazamiento a lo largo del eje z') que experimenta la cabina se muestran en la figura 3-(b).

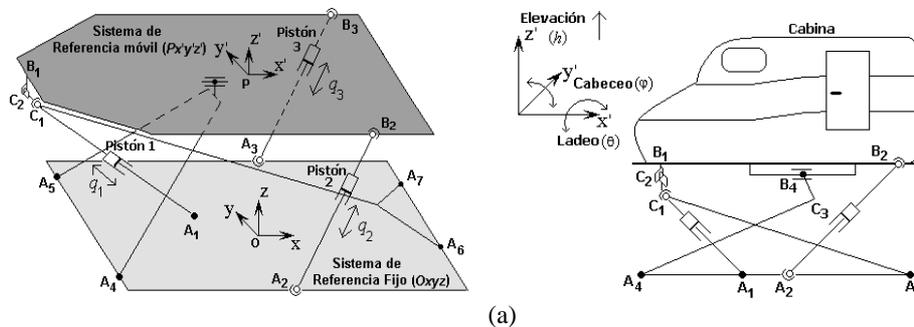


Figura 3. Variables para la confección del modelo cinemático y movimientos de la cabina en el espacio cartesiano.

Para calcular la orientación del elemento terminal se hace uso de los ángulos de Euler, empleando el convenio ZYX conocido como "roll-pitch-yaw" ^{1,15}; planteándose la expresión para la matriz de rotación (${}^A R_B$) con ángulo de guiñada cero ($\psi=0$) según:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen } \psi & 0 \\ \text{sen } \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \text{sen } \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\theta) & \text{sen}(\varphi)\cos(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ -s(\varphi) & \cos(\varphi)\text{sen}(\theta) & \cos(\varphi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las expresiones matemáticas de los vectores de cierre para cada una de las cadenas cinemáticas activas, que unen los puntos A_i de la base fija (cuyas coordenadas son conocidas) con los puntos B_i de la plataforma móvil (cuyas coordenadas dependen de la pose de la plataforma móvil); quedan definidas como:

$$\overrightarrow{A_1 B_1} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_1} - \overrightarrow{OA_1} \quad (4)$$

$$\overrightarrow{A_2 B_2} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_2} - \overrightarrow{OA_2} \quad (5)$$

$$\overrightarrow{A_3 B_3} = \overrightarrow{OP} + {}^A R_B \overrightarrow{PB_3} - \overrightarrow{OA_3} \quad (6)$$

Dada la configuración estructural del robot, la plataforma móvil experimenta al elevarse un movimiento de traslación curvilínea en el plano $x-z$, según se muestra en la figura 4. Para conocer el desplazamiento adicional que sufre la plataforma móvil al elevarse, se desarrollan las ecuaciones de la línea recta $B_1 B_1'$ en el plano $z-x$, y del círculo de radio r en coordenadas cartesianas, según lo indicado en dicho esquema.

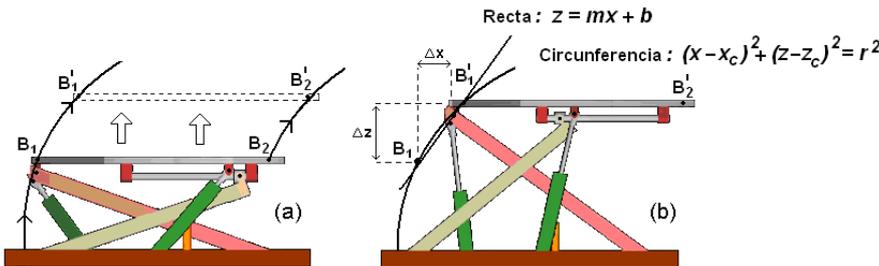


Figura 4. Traslación curvilínea de la plataforma móvil: (a) Altura mínima; (b) Altura máxima.

Para encontrar la intersección de la recta $B_1 B_1'$ con la circunferencia de radio r , se sustituye la expresión de la recta en la ecuación de la circunferencia, obteniéndose:

$$(7)$$

Desarrollando (7) y expresando la misma en forma polinómica obtenemos:

$$k_1 x^2 + k_2 x + k_3 = 0 \quad (8)$$

donde: $k_1 = 1 + m^2$; $k_2 = 2m(b - z_c) - 2x_c$; $k_3 = x_c^2 + z_c^2 + b(b - 2z_c) - r^2$

Las raíces de la expresión (8) son:

$$x_{1,2} = \frac{-k_2 \pm \sqrt{k_2^2 - 4k_1k_3}}{2k_1} \quad (9)$$

El desplazamiento en el eje z (Δz) como función del desplazamiento en el eje x (Δx) se obtiene:

$$\Delta z = (mx_2 + b) - (mx_1 + b) = m(x_2 - x_1) \quad (10)$$

Sustituyendo (9) en (10), ordenando y reagrupando llegamos a:

$$\Delta z = m \left[\left(\frac{k_2}{k_1} \right)^2 - \frac{4k_3}{k_1} \right] \quad (11)$$

La ecuación (11) se incorpora al sistema de ecuaciones de la cinemática inversa, para corregir los valores de las coordenadas de los puntos B_i de la plataforma móvil.

Dado que la elongación inicial de los actuadores (L_{oi}) resulta conocida, entonces es posible calcular el desplazamiento articular (Δq_i) evaluando la expresión $\Delta q_i = \Delta L_i - L_{oi}$ donde la elongación ΔL_i se obtiene de la solución de la cinemática inversa, según el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{(2076 - \lambda_0 - 940 \cos \varphi)^2 + (740 + h + 940 \operatorname{sen} \varphi)^2} \\ L_2 &= \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720 \cos \varphi + \lambda_4)^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2} \\ L_3 &= \sqrt{(1397 - \lambda_0 + 720 \cos \varphi - \lambda_4)^2 + \lambda_2^2 + (-\lambda_3 - \lambda_4)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

siendo: $\lambda_0 = \sqrt{1672^2 - 1720h - h^2}$; $\lambda_1 = 500 \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \varphi$; $\lambda_2 = 500 \cos \theta - 500$; $\lambda_3 = 500 \operatorname{sen} \theta \cos \varphi$; $\lambda_4 = 720 \operatorname{sen} \theta + 945 + h$

El sistema de ecuaciones (12) permite calcular el vector de coordenadas articulares $[q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ del robot a partir de las variables que definen la posición/orientación de la plataforma móvil $[h \ \theta \ \varphi]^T$. Dichas ecuaciones presentan la característica que los coeficientes varían en función de la posición inicial en que se encuentre el robot; por lo tanto, los valores de L_{oi} permiten ajustar

dichas ecuaciones en dependencia del punto de operación (elongación inicial) que se desee definir para los actuadores prismáticos del robot.

Validación de la cinemática inversa

En el campo de la robótica, la simulación permite estudiar el comportamiento cinemático y dinámico de tales mecanismos sin necesidad de utilizar técnicas experimentales que pueden dañar su estructura; posibilita además corregir errores de diseño y ajustar los lazos de control. La simulación también resulta de gran utilidad en la validación de modelos matemáticos del robot ¹⁹.

Dado el carácter altamente no lineal de las expresiones cinemáticas enunciadas en (12), así como su importancia a la hora de implementar el control del sistema, se procede a validar las mismas mediante el paquete de software MSC.Adams; herramienta de probada efectividad en el diseño, modelado y simulación de ecuaciones cinemáticas y dinámicas de estructuras mecánicas paralelas.

Se confeccionó en Adams el modelo virtual del robot considerando todos los elementos y partes que conforman la arquitectura mecánica del mismo. Luego, para validar las ecuaciones cinemáticas, se programa en el Matlab/Simulink trayectorias a seguir por la plataforma móvil para las variables de altura $h(t)$, ladeo $\theta(t)$ y cabeceo $\varphi(t)$ definidas respectivamente por las ecuaciones siguientes:

$$h(t) = 75 \cos \omega t^2 (0.15 + \text{sen} 4\omega t) (0.15 + \cos 4\omega t) + 100 \quad (13)$$

$$\theta(t) = 12 \cos \omega t^2 (0.1 + \text{sen} 4\omega t)^2 - 5 \quad (14)$$

$$\varphi(t) = 9 \text{sen} \omega t^2 (0.1 + \cos \omega t^2)^2 - 5 \quad (15)$$

Las trayectorias se generan para valores de $\omega = 0,1$ rad/seg, frecuencia que puede ser seguida dinámicamente por el robot. Para variar la altura se aplica a la plataforma móvil un desplazamiento entre 50 y 155 mm a lo largo del eje z' , siguiendo una trayectoria de tipo sinusoidal definida por (13). Las variaciones en el ladeo y cabeceo responden a las expresiones (14) y (15) respectivamente; produciendo variaciones sinusoidales entre 10° y -18° para el ladeo y entre 6° y -15° para el cabeceo.

En el Matlab/Simulink se programa el bloque con las ecuaciones de la cinemática inversa; al mismo se le aplican como entradas las señales de altura, ladeo y cabeceo generadas según (13), (14) y (15). Luego, las salidas del bloque de cinemática inversa correspondiente a las variables articulares (q_1 , q_2 , q_3) ingresan como desplazamientos deseados al modelo virtual del robot desarrollado en Adams, según el diagrama de bloques de figura 5.

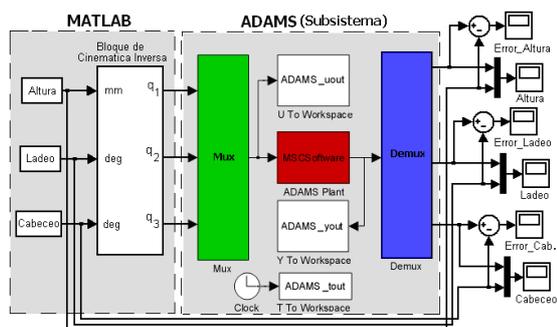


Figura 5. Diagrama de bloques de la simulación conjunta Matlab-Adams.

El modelo virtual devuelve las variaciones en la pose del elemento terminal, que se utilizan para comparar con las trayectorias iniciales de las variables $h(t)$, $\theta(t)$ y $\varphi(t)$.

Los resultados de la validación arrojados por la cosimulación se muestran en la figura 6; observándose de manera evidente la similitud entre las curvas obtenidas de la solución de las expresiones analíticas y de la salida del modelo virtual en ADAMS, lo que prueba la validez del sistema de ecuaciones correspondiente a la cinemática inversa enunciadas en (12).

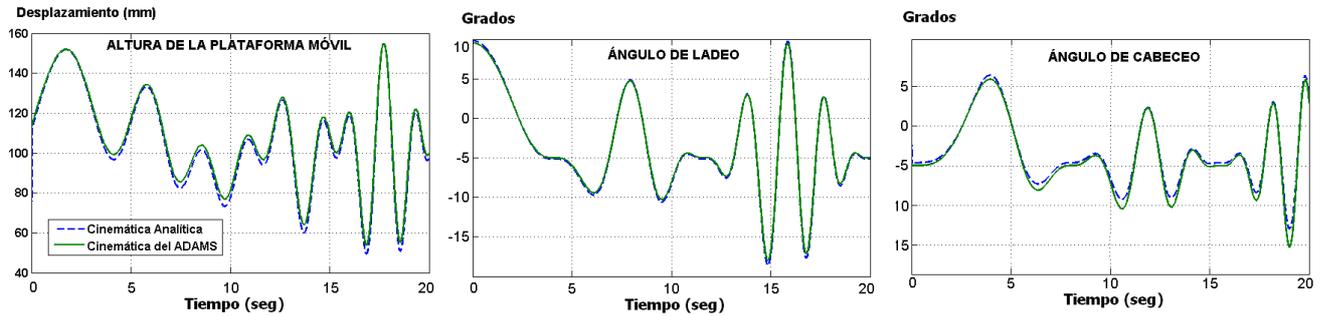


Figura 6. Trayectorias de la plataforma al solucionar la cinemática del robot.

CONTROL ARTICULAR

El control de robots accionados por actuadores neumáticos constituye un reto dado su carácter no lineal, baja viscosidad del aire, y la existencia de fuerzas de fricción estáticas y dinámicas, lo cual provoca perturbaciones al sistema dificultando el control ^{16, 17}.

Considerar que las articulaciones del robot están desacopladas, de modo que la fuerza de un determinado actuador únicamente tendrá efecto, sobre el movimiento de la articulación correspondiente, tiene la ventaja que el diseño del regulador puede hacerse utilizando las técnicas más frecuentes de diseño. En este sentido se han efectuado trabajos previos de investigación relacionados con la identificación, modelado y control de plataforma neumática de 2 gdl ^{16, 18}; pero dicha aplicación se realiza sobre un robot de arquitectura simple y no acoplado.

El caso que nos ocupa constituye un robot paralelo de 3 gdl con mayor complejidad en su estructura mecánica, donde resulta necesario el accionamiento en conjunto de varios actuadores para lograr un solo grado de libertad. Dadas las prestaciones de diseño de la plataforma de simulación, los valores deseados de la pose de la plataforma vienen dados en el espacio de tareas, y por lo tanto para concebir el esquema de control desacoplado se requiere disponer de las ecuaciones de la cinemática inversa, para de esta forma calcular los valores deseados de las variables articulares a partir de conocidas la posición/orientación del elemento terminal.

El esquema de control desacoplado en el espacio articular propuesto se muestra en la figura 7. Las señales de referencia de la pose de la plataforma móvil en el espacio cartesiano se reciben desde un ordenador donde están disponibles las escenas del mundo virtual; estas señales se ingresan al bloque de cinemática inversa que contiene programadas las expresiones obtenidas en (12), brindando como salida los valores deseados de las variables articulares de cada extremidad activa del robot que constituyen los puntos de consigna del lazo de control de posición. Como actuadores se emplean cilindros neumáticos FESTO DNC-125-500 de doble efecto, cuyos desplazamientos lineales producen los movimientos en la cabina. Las elongaciones de los vástagos de los cilindros son sensadas por potenciómetros lineales MLOPOT-500-TLF cuya salida de voltaje se emplea como señal de retroalimentación para los lazos de control, lográndose con ello desplazamientos estables y precisos de las articulaciones prismáticas.

Los lazos de control se implementan de manera independiente para cada cadena cinemática actuada; el regulador consiste en control PI en cascada con un filtro de 2do orden con frecuencia de corte de 80 Hz, para compensar los polos complejos conjugados de la planta, garantizando que la válvula proporcional de flujo no sea excitada por encima de su ancho de banda.

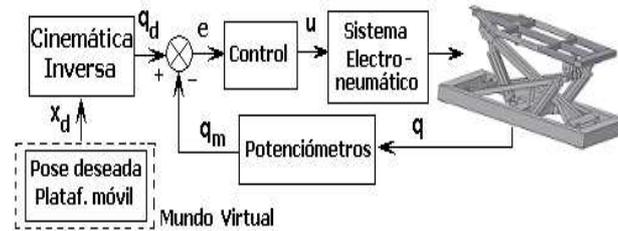


Figura 7. Esquema de control articular desacoplado basado en la cinemática inversa

Para obtener la función transferencial del sistema válvula-pistón se identifica dinámicamente el mismo para cada extremidad activa del robot, dividiendo la carrera del cilindro en tramos e identificando alrededor de cada uno de los puntos. La longitud de cada tramo se selecciona de manera tal que en su conjunto abarque toda la carrera del vástago. El ancho de banda y amplitud de la señal de excitación de entrada se escoge de forma tal que garanticen que el sistema electro-neumático responda persistentemente excitado durante todo el proceso de identificación experimental.

Las funciones de transferencia de los sistemas válvula-pistón obtenidas por identificación experimental son:

$$\text{Sistema electro-neumático del pistón 1: } \quad \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{246}{s(s^2 + 7.73s + 253)} \quad (16)$$

$$\text{Sistema electro-neumático de los pistones 2 y 3: } \quad \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{2008}{s(s^2 + 7.3s + 1349)} \quad (17)$$

Los controladores se diseñan en función de la localización deseada de los polos de lazo cerrado, según método aplicado a plataforma neumática de 2 gdl^{16,18}, donde la función transferencial del controlador propuesto adquiere la forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (s^2 + a_1s + a_0)(s + a_2)}{s(s^2 + b_1s + b_0)} \quad (18)$$

El sistema en lazo cerrado es dominado por un par de polos complejos conjugados con valores de $\xi = 0.7$ y $\omega_n = 10$ rad/s; obteniéndose las siguientes funciones de transferencia para cada uno de los controladores, es decir:

$$\text{Controlador del pistón 1: } \quad \frac{U_1(s)}{E_1(s)} = \frac{265(s^2 + 7.7s + 253)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)} \quad (19)$$

$$\text{Controladores de los pistones 2 y 3: } \quad \frac{U_2(s)}{E_2(s)} = \frac{U_3(s)}{E_3(s)} = \frac{32(s^2 + 7.7s + 1349)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)} \quad (20)$$

Simulación del esquema de control de posición

Para llevar a cabo la simulación del sistema de control, se procede a programar en el Matlab-Simulink el bloque con las ecuaciones de la cinemática inversa (12), las funciones transferenciales del sistema electro-neumático (16), (17) y controladores (19), (20).

El modelo del robot que se emplea para la simulación es el modelo virtual confeccionado en el ADAMS que se exporta como subsistema hacia el Simulink, donde las entradas son los desplazamientos articulares y la salida las variables que definen la posición/orientación de la plataforma móvil. Durante la simulación se somete a la plataforma móvil a seguir variaciones sinusoidales de 100 mm de amplitud alrededor de 1300 mm de elevación de la misma, aplicándose además oscilaciones en forma de tren de pulsos de 8 y -8 grados de amplitud para los ángulos de ladeo y cabeceo respectivamente. Estas variaciones en el espacio cartesiano luego de pasar por el bloque de cinemática inversa producen elongaciones en los cilindros neumáticos con amplitudes que oscilan entre 90 y 325 mm para el pistón 1; 20 y 370 mm para el pistón 2 y entre 40 y 372 mm para el pistón 3, constituyendo los valores de referencia articulares que se ingresan al lazo de control de posición articular. En la figura 8 se grafican las señales de referencia y las elongaciones de los cilindros neumáticos del robot bajo las consideraciones mencionadas anteriormente.

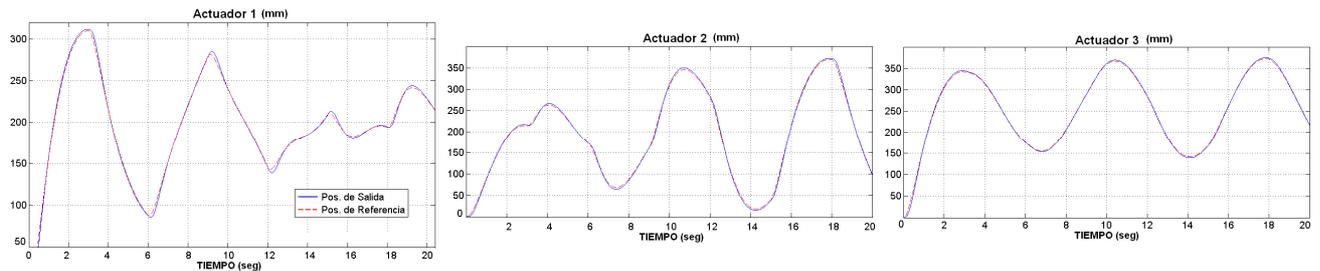


Figura 8. Desplazamientos articulares al variar la pose de la plataforma móvil durante la simulación.

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Luego de la simulación, se llevan a cabo las pruebas experimentales, con el propósito de evaluar el desempeño del sistema, así como el comportamiento del error articular. Se emplea un ordenador Pentium D a 3 GHz con tarjeta PCI Humusoft MF624 de 16 E/S analógicas para la adquisición de la medición articular (sensada por los potenciómetros lineales) y enviar las señales de mando hacia las válvulas proporcionales de flujo MPYE-5-3/8. La PC también se emplea para generar las curvas deseadas de altura, ladeo y cabeceo a seguir por el simulador de movimiento.

Se utiliza el ambiente de tiempo real del Matlab (Real-Time Windows Target) para ejecutar desde el Simulink las acciones de control en tiempo real del sistema, empleándose un período de muestreo de 1 ms.

Desde el punto de vista práctico, para evitar daños en el robot por excesiva amplitud en la señal de mando, se pasa por un prefiltro de 2do orden la señal de entrada de referencia de posición, garantizando con ello cambios suaves a la entrada del lazo.

Las variaciones en las señales de altura, ladeo y cabeceo a seguir por el elemento terminal, son las mismas que se aplicaron durante la simulación. Las curvas experimentales y errores de posición (mm) articular se muestran en las figura 9 y 10 respectivamente.

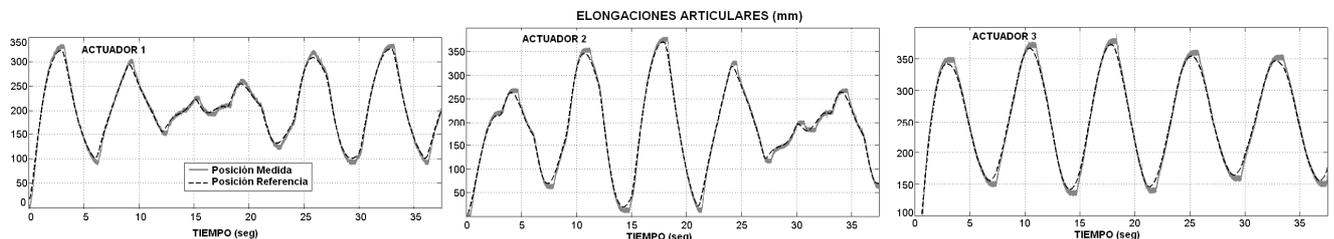


Figura 9. Desplazamientos de los actuadores durante las pruebas experimentales.

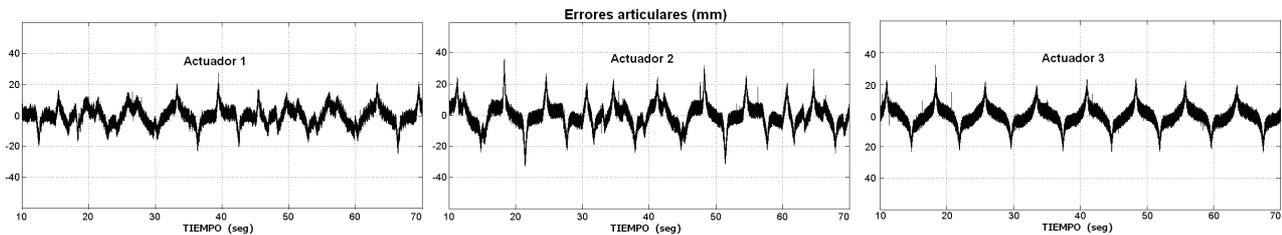


Figura 10. Errores en las articulaciones activas del robot arrojados por las pruebas experimentales.

Dado el bajo costo computacional exigido por el lazo de control propuesto, desde el punto de vista industrial, se implementan los algoritmos de control en controladores empujados basados en dsPIC 30F4013.

A partir de los resultados obtenidos tanto de la simulación como de los experimentos, podemos plantear que satisfactoriamente se cumplen los requisitos establecidos para la aplicación de simulador de movimiento en tiempo real.

CONCLUSIONES

Se demuestra la efectividad del esquema de control de posición en el espacio articular propuesto, garantizando el adecuado desempeño del sistema, en términos de error en estado estable y mínimo de sobrecresta. En tal sentido se observa la correspondencia entre las curvas teóricas obtenidas por simulación y los resultados arrojados por las pruebas experimentales realizadas.

Se expone la eficacia del procedimiento de cosimulación Matlab-Adams, donde además de emplearse para validar el sistema de ecuaciones cinemáticas, permitió diseñar el controlador y simular el comportamiento integral del sistema robótico en su conjunto.

Se demuestra la efectividad del modelo cinemático así como las prestaciones del esquema desacoplado de control de posición basado en relaciones cinemáticas aplicado a una plataforma neumática industrial de 3 grados de libertad.

El trabajo realizado sienta las bases para llevar a cabo el estudio de otras estrategias de control donde se emplee la cinemática diferencial, con posibilidad de prealimentar la segunda derivada de la posición e implementando variantes de control en el espacio de tareas para seguimiento de trayectoria, facilitando con ello el desarrollo de trabajos futuros de investigación.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda dada por el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Simuladores "CIDSIM" gracias al apoyo brindado por sus especialistas, directivos, y personal técnico en general, así como a su disposición de facilitar los medios técnicos y de cómputo necesarios para el desarrollo de las investigaciones y experimentos que en este trabajo se exponen.

REFERENCIAS

1. LENARCIC, J. & ROTH, B. *Advances in Robot Kinematics. Mechanisms and Motion*. 1st Ed. Springer, Netherlands, 2006.
2. VIVAS, A. & POIGNET, P. "Control Predictivo de un Robot Paralelo," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 3, No. 4, pp. 46-53, 2006.
3. TSOI, Y. H. & XIE, S. Q. "Design and Control of a Parallel Robot for Ankle Rehabilitation," *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP08)*, Auckland, New-Zealand, pp. 515-520, 2008.
4. GUPTA, A. "Design, Control and Performance of RiceWrist: A Force Feedback Wrist Exoskeleton for Rehabilitation and Training," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 233-251, 2008.
5. MERLET, J. P. "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots," *Journal of Mechanical Design* Vol. 128, No. 1, pp. 199-207, 2006.
6. M.J.D. Hayes & R. G. Langlois, "Atlas Motion Platform Generalized Kinematic Model," *2nd Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms*, France, pp. 227-234, 2008.

7. **AGUIRRE, G.** “Kinematics and Dynamic Analyses of a 3 d.o.f Parallel Manipulator by Symbolic Formulations,” *Proceedings of Multibody Dynamics IDMEC/IST*, Lisbon, Portugal, 2003.
8. **SABRIE, E. & GOSSELIN, C.** “Kinematic and Dynamic Analysis of a New Rotational Motion Simulator,” in *Robotics and Manufacturing Systems*, Canada, 2004.
9. **CHEN, C. K. & HWANG, J.** “Iterative Learning Control for Position Tracking of Pneumatic Actuated X-Y Table,” in *IEEE International Conference on Control Applications*, Taipei, China, 2004.
10. **ROLLAND, L.** “Synthesis of the Forward Kinematics Problem Algebraic Modeling for the General Parallel Manipulator Displacement-based Equations,” *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 9, pp. 1071-1092, 2007.
11. **CHABLAT, D. & MERLET, J. P.** “An Interval Analysis Based Study for the Design and the Comparison of 3 d.o.f Parallel Kinematic Machines,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 6, pp. 615-624, 2004.
12. **REN, L. & MILLS, J.K.** “Comparison of Control Approaches For Tracking Control of a 3 DOF Parallel Robot: Experimental Results,” *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV '06*, Singapore, pp. 5-8, 2006.
13. **WOBBE, F.** “Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots,” InTech Education and Publishing: Automation and Robotics, Vol. 1, No. 2, pp. 17-40, 2008.
14. **CHALBAT, D. & STAIUCU, S.** “Kinematics of a 3-PRP Planar Parallel Robot,” *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 71, No. 2, pp. 3-15, 2009.
15. **IZAGUIRRE, E. & MELLADO, M.** “Modeling and Simulation of Parallel Robot of Three Degree of Freedom with Virtual Robot Simulator,” in *13th International Convention and Fair, SIA-2009*, International Convention Center, Havana, Cuba, 2009, ISBN 978-959-286-010-0.
16. **RUBIO, E.** “Implementation of Decoupled Model-Based Controller in a 2-DOF Pneumatic Platform used in Low-Cost Driving Simulators,” *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference CERMA '09*, Morelos, Mexico, 2009, ISBN 978-0-7695-3799-3.
17. **HAHN, H.** “Mathematical Modeling, Control, Computer Simulation and Laboratory Experiments of a Spatial Servopneumatic Parallel Robot,” *Nonlinear Dynamics*, Vol. 40, pp. 387-417, 2005.
18. **RUBIO, E. & HERNÁNDEZ, L.** “Modelado, Identificación y Control de Actuadores Lineales Electro-neumáticos. Aplicación en Plataforma de Dos Grados de Libertad,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 4, No. 4, pp. 58-69, 2007.
19. **BEN, S. & ROMDHANE, L.** “A Software Package for Parallel Mechanisms Modeling and Simulation,” in *International Workshop on Computational Kinematics*, Cassino, Italy, 2005.

AUTORES

Eduardo Izaguirre Castellanos

Ingeniero en Control Automático, Master en Automática, Profesor Auxiliar. Investiga en modelado, simulación y control de robots paralelos. Miembro del Grupo de Investigaciones de Automática, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV. Tel: 0142-281632 Correo: izaguirre@uclv.edu.cu

Eduardo Izaguirre, Luis Hernández, Ernesto Rubio, Pablo J. Prieto, Orlando Urquijo

Luis Hernández Santana

Ingeniero en Control Automático, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Jefe del GARP en la UCLV, Investiga en el área del modelado, simulación y control de Sistemas Mecatrónicos. Correo: luishs@uclv.edu.cu

Ernesto Rubio Rodríguez

Ingeniero en Automática, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar. Investiga en modelado, simulación y control de actuadores electro-neumáticos en aplicaciones robóticas. Miembro del GARP de la UCLV, Correo: rubio@uclv.edu.cu

Pablo José Prieto Estenza

Ingeniero en Automática, Miembro del GARP de la UCLV, Profesor Instructor, Investiga en modelado y simulación de sistemas multicuerpos. Correo: pablop@uclv.edu.cu

Orlando Urquijo Pascual

Ingeniero en Automática, Miembro del GARP de la UCLV, Profesor Instructor, Investiga en el campo de control de robots paralelos en aplicaciones de simulador de movimiento. Correo: orlandop@uclv.edu.cu