

CONTROL CARTESIANO EN CASCADA CON REALIMENTACIÓN DIRECTA PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA EN ROBOT PARALELO NEUMÁTICO DE 3 GDL

CASCADED CARTESIAN CONTROL WITH FEEDFORWARD FOR TRAJECTORY TRACKING IN 3 DOF PNEUMATIC PARALLEL ROBOT

Eduardo Izaguirre Castellanos¹, Orlando Urquijo Pascual¹, Luis Hernández Santana¹,

1. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba, izaguirre@uclv.edu.cu, C. Camajuaní, Km 5 ½, Santa Clara, VC.

RESUMEN: *En este artículo se propone un esquema de control cinemático en el espacio de tareas para un robot paralelo neumático de 3 grados de libertad. En correspondencia con la aplicación de simulador de movimiento, se incorpora un lazo de realimentación directa para mejorar los índices de desempeño del sistema ante seguimiento de trayectorias. El esquema de control considera un doble lazo en cascada, donde el lazo interior soluciona el control articular del robot, mientras el externo se diseña en el espacio de tareas para minimizar el error de posicionamiento de la plataforma móvil del robot, donde se implementa un sistema sensorial exteroceptivo. Para solucionar el problema de seguimiento de trayectoria se realimenta la señal de referencia, bajo un esquema de control cinemático en el espacio de tareas. Los resultados de los experimentos confirman la respuesta de seguimiento esperada, en términos de desempeño del sistema y cero error en estado estable, en aplicación industrial de simulador de movimiento.*

Palabras Claves: Robot paralelo, seguimiento de trayectoria, control cinemático, plataforma de simulación.

ABSTRACT: *In this paper, the kinematic task space control for 3-dof electro-pneumatic actuated parallel robot is proposed. According with the application of industrial motion simulator, the feedforward loop is incorporated in order to improve the performances indexes of the system in trajectory following problem. The control system consists in two cascaded loops; the internal loop solved the robot joint control, whereas external loop is designed in task space configuration for minimizing the positioning error of the mobile platform, in that case the exteroceptive sensorial system is also designed. For the solution of the trajectory following problem the desired input is feed-forwarded according the specific condition of the digital implementation for the kinematic task space control scheme. Experimental results confirm the expected tracking response of the system in terms of performance indexes and zero steady state error, in industrial application of motion simulator.*

KeyWords: Parallel robot, trajectory following, kinematic control, motion simulator platform.

1. INTRODUCCIÓN

Gracias a la elevada precisión de posicionamiento, pequeños errores, alta repetitividad, y capacidad de manejar grandes cargas, las aplicaciones de los robots paralelos han aumentado notablemente en los últimos años [1]. En consecuencia con ello, se

han incrementado las investigaciones y experimentos en estos sistemas robóticos, donde de manera particular se destacan los estudios encaminados a desarrollar apropiados esquemas y estrategias de control para lograr alcanzar las máximas prestaciones posibles en los mismos [2], [3].

En la literatura especializada, se define un robot paralelo, como aquel cuya estructura mecánica que une la base fija con el elemento terminal (o plataforma móvil) está compuesta por dos o más cadenas cinemáticas cerradas, donde al menos una resulta ser actuada [4]. Dada la complejidad de tales mecanismos, se tornan más difíciles los procedimientos de modelado, control, y sistemas sensoriales a implementar [5].

De manera particular los robots paralelos utilizados como simuladores de movimiento han incursionado de manera creciente en aplicaciones tales como entrenamiento de conductores de vehículos [6], simuladores de vuelo [7], rehabilitación médica [8], entretenimiento y ocio [9], etc.

El objetivo de este trabajo consiste en el diseño de sistema de control en el espacio de tareas para gobernar un robot paralelo de tres grados de libertad (gdl), accionado neumáticamente. Se mejoran las prestaciones del mismo, para lograr un adecuado posicionamiento de la plataforma móvil en el espacio 3D, con capacidad de seguimiento de trayectoria con cero error en estado estable. El robot se emplea como simulador industrial de movimiento, por lo que debe ser capaz de seguir fielmente la señal de referencia de trayectoria, ubicando la pose de la plataforma móvil en las coordenadas espaciales deseadas en cada instante de tiempo.

En este contexto resulta imprescindible el desarrollo de los modelos cinemático y dinámico-articular del robot, como premisa para diseñar un esquema de control que garantice cumplir con las especificaciones exigidas para este tipo de aplicación, a pesar del carácter acoplado del sistema, las no linealidades y los fenómenos de interacción dinámica entre los actuadores del robot [10].

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. Cuando resulta necesario conocer la pose que adquiere la plataforma móvil a partir de conocidas las variables articulares actuadas, estamos ante el problema cinemático directo, sin embargo, cuando las variables conocidas son la posición y orientación del elemento terminal y las incógnitas son las coordenadas articulares del robot, nos enfrentamos al problema cinemático inverso [11]. 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 [12], [13].

Por otro lado, el modelo dinámico en un robot para-

lelo, se caracteriza por ser altamente no lineal y complejo. En la literatura se reportan contribuciones, donde se utiliza el cálculo de la dinámica inversa del robot para el diseño de un regulador dinámico (Inverse Dynamics Control -IDC-) [14], [15]. No obstante este tipo de control obliga a efectuar simplificaciones, donde no siempre es posible obtener un modelo dinámico expresado de forma cerrada, por lo que deben emplearse métodos iterativos para encontrar su solución, cuyos procedimientos numéricos (sobre todo el problema dinámico inverso) deben garantizar en la práctica la convergencia hacia la solución, siendo la eficiencia de los algoritmos de cómputo una problemática aún presente [4].

Otra problemática asociada al IDC, es que el desempeño del lazo está fuertemente ligado a la exactitud del modelo dinámico obtenido, cuya solución exige elevadas prestaciones del hardware de cómputo, siendo los algoritmos difícilmente implementables en controladores industriales empotrados. Una desventaja del controlador basado en la dinámica inversa está relacionada con la robustez, donde la inexacta cancelación debido a incertumbres paramétricas, pueden hacer inestable al mejor controlador, no obteniéndose el desempeño esperado cuando se implementa en la práctica [16].

Por consiguiente, la necesidad de aplicar un esquema de control cinemático en el espacio cartesiano, para lograr mejor desempeño del sistema robótico bajo estudio, en una aplicación de simulador de movimiento, implica enfrentarse la problemática del cálculo en línea de la cinemática directa, y disponer de un modelo dinámico preciso del robot [17]. A ello se suma, cumplir con las exigencias de tiempo real y muestreo del orden de los milisegundos, exigidos por la aplicación [10].

El presente trabajo está dividido en 6 secciones, luego de la sección primera correspondiente a la introducción, se procede a realizar la descripción del robot y descripción de los modelos del sistema que serán utilizados en los esquemas de control. En el epígrafe tercero se plantea el control articular basado en las relaciones de la cinemática inversa, donde posteriormente se propone un esquema cartesiano de doble lazo en cascada, para continuar con la mejora del sistema ante seguimiento de trayectoria, mediante la inclusión de un lazo de realimentación directa. En la cuarta sección se procede a mostrar los resultados arrojados por las pruebas experimentales y finalmente se plantean las conclusiones del artículo que se enuncian en la quinta sección.

El esquema de control propuesto cumple con las especificaciones de diseño exigidas, en una aplicación de simulador industrial de movimiento, ante exigencias de tiempo real y bajos periodos de muestreo del orden de los milisegundos, y con fac-

tilidad de implementación de los algoritmos de control en controladores empotrados de bajo costo.

2. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT Y MODELOS DEL SISTEMA A IMPLEMENTAR

El sistema robótico bajo estudio consiste en un robot paralelo de 3 gdl (ver Figura 1). El mismo es fabricado por la empresa CIDSIM, que se dedica a la producción de simuladores industriales de movimiento para disímiles aplicaciones.



Figura. 1: Robot SIMPRO: Plataforma neumática de simulación de estructura paralela de 3 gdl

Dicho robot es accionado por actuadores electro-neumáticos (Figura 2-a), que se conectan entre la base fija y la plataforma móvil, de manera tal que las elongaciones lineales de los mismos producen los movimientos y orientaciones deseadas en la plataforma móvil. Los actuadores están formados por cilindros neumáticos de doble efecto (DNC-125-500), siendo gobernados por válvulas proporcionales de flujo (MPYE-5-3/8), donde todo el sistema electro-neumático se alimenta por una estación con regulación y filtro de aire comprimido (Figura 2-b).



Figura. 2: Actuadores electro-neumáticos del robot (a) y estación de regulación de aire comprimido (b)

Entre las características más importantes del robot SIMPRO, que inciden de manera importante en el control del mismo, podemos mencionar:

1. Estructura mecánica compleja.
2. Robot altamente acoplado.
3. Actuadores neumáticos no lineales.
4. Interacción dinámica articular.

Las cadenas cinemáticas que unen la base fija con

la plataforma móvil, conforman una arquitectura del tipo RPSU-2SPS, donde gracias a los desplazamientos lineales de los actuadores se garantiza la movilidad deseada de la plataforma móvil. En este contexto se establecen los tres grados de libertad del sistema, definidos como elevación, ladeo y cabeceo, cuyas especificaciones son mostradas en la Tabla 1.

Tabla I: Descripción de los grados de libertad del robot paralelo

Grados de libertad	Amplitud del movimiento
Elevación (h)	± 215 mm
Ladeo (θ)	± 18 grados
Cabeceo (φ)	± 17 grados

Los movimientos de ladeo y cabeceo se definen como las rotaciones de la plataforma móvil alrededor de los ejes x' , y' respectivamente, mientras que la elevación representa el desplazamiento de la plataforma móvil a lo largo del eje z' , según se indica en la Figura 3.

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.

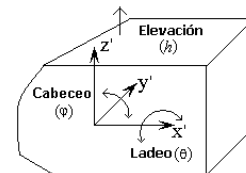


Figura. 3: Representación de los grados de libertad en la cabina soportada por la plataforma móvil

Como actuadores se emplean cilindros neumáticos de doble efecto, cuyos desplazamientos lineales producen los movimientos en la cabina, mientras que las elongaciones 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.

La ubicación deseada de la plataforma móvil es dada mediante variables que definen la posición/orientación de la misma en el espacio cartesiano; luego es necesario transformar dichas variables a los valores articulares, mediante la solución de las ecuaciones cinemáticas del robot. Por consiguiente la posición del elemento terminal en el espacio cartesiano es la salida más importante del sistema.

2.1 Modelo Cinemático del Robot

Una de las desventajas reconocidas de los robots paralelos radica en la dificultad en la resolución de los modelos cinemático y dinámico. No obstante las expresiones tanto de la cinemática directa como la inversa, resultan de gran interés en la concepción de esquemas de control de posición y seguimiento de trayectoria, así como para estimar la pose de la plataforma móvil a partir de conocidas las variables espaciales de ubicación de la plataforma móvil y viceversa [18].

Las expresiones cinemáticas estudian el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia, sin tener en cuenta las fuerzas o pares que lo producen, estableciéndose una relación analítica entre las funciones que representan el movimiento articular y las que describen la pose del elemento terminal en el espacio de trabajo (Figura 4).

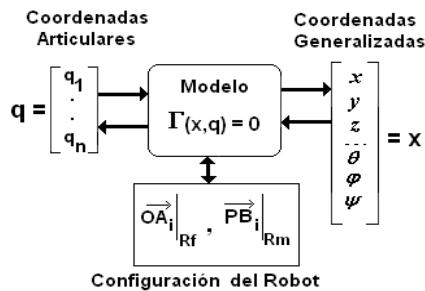


Figura. 4: Diagrama de bloques generalizado del modelo cinemático del robot

De esta manera, se obtiene un modelo cinemático que toma la forma de la expresión (1), el cual establece una relación implícita entre los parámetros de configuración y las variables de la pose del robot.

$$\Gamma\left(x, q, \overrightarrow{OA_i}|_{R_f}, \overrightarrow{PB_i}|_{R_m}\right) = 0 \quad (1)$$

Considerando la expresión general (1), el modelo cinemático del robot, es obtenido a partir de emplear la formulación vectorial, donde mediante procedimiento geométrico se desarrolla un sistema de ecuaciones cinemáticas con igual cantidad de ecuaciones que de incógnitas [10]. Las expresiones analíticas obtenidas son validadas mediante el paquete de software MSC.Adams® [19]. El procedimiento de obtención de estas ecuaciones, se encuentra enunciado en numerosas publicaciones de los autores, donde se pueden encontrar debidamente fundamentados y desarrollados los pasos seguidos para su obtención [10], [19]-[21].

Las ecuaciones cinemáticas, en particular las correspondientes a la cinemática inversa, permiten

calcular las coordenadas articulares deseadas, a partir de conocida la posición/orientación que debe alcanzar la plataforma móvil del robot en el espacio tridimensional.

2.2 Modelo del Pistón Electro-neumático

El modelo dinámico del robot paralelo es multivariable y presenta un carácter fuertemente no lineal y acoplado [22], por lo que su empleo para el diseño de un controlador IDC implicará un preciso cálculo de los parámetros dinámicos, con la desventaja que el desempeño del lazo depende fuertemente de la exactitud del modelo dinámico obtenido. Adicionalmente demandará el cómputo de operaciones matriciales a ejecutar dentro del lazo de control, con inversión de matrices, imponiendo altas exigencias al hardware de control [10]. Por consiguiente, se decide prescindir del mismo y en su lugar utilizar el modelo dinámico de los actuadores del robot a partir de datos de entrada-salida obtenidos mediante identificación experimental con la planta real, y bajo estas condiciones efectuar la síntesis de los controladores articulares [20]-[21].

El modelo correspondiente al sistema válvula-pistón se obtiene de aplicar un método para la modelación dinámica basada en identificación experimental desarrollado por E. Rubio para plataforma neumática de 2 gdl [23], cuya formulación se extiende al simulador de movimiento de tres grados de libertad, de mayor complejidad y carácter acoplado. En este caso las funciones de transferencia obtenidas experimentalmente para los actuadores electro-neumáticos del robot, son las siguientes:

$$Pistón\ 1 = \frac{246}{s(s^2 + 7.73s + 253)} \quad (2)$$

$$Pistones\ 2\ y\ 3 = \frac{2008}{s(s^2 + 7.3s + 1349)} \quad (3)$$

El modelo dinámico del sistema válvula-pistón basado en identificación dinámica experimental con la planta real, sirve para la síntesis de los controladores y posterior implementación del esquema de control articular desacoplado del robot.

3. ESQUEMAS DE CONTROL

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.

Por consiguiente, se procede a diseñar los controladores en función de la localización deseada de los polos de lazo cerrado, para obtener una respuesta articular ligeramente subamortiguada (para $\xi = 0.7$ y $\omega_n = 10$ rad/s), minimizando el valor de la sobrecresta y llevando a cero el error de posicionamiento articular. Con dichos índices de comportamiento se obtienen las funciones transferenciales (4) y (5) correspondientes a los controladores sintetizados bajo los índices de comportamiento deseados para la aplicación. Gracias a ello se puede llevar a cabo la implementación de los lazos de control articulares del robot.

$$G_{C1} = \frac{265(s^2 + 7.7s + 253)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)} \quad (4)$$

$$G_{C2} = G_{C3} = \frac{32(s^2 + 7.7s + 1349)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)} \quad (5)$$

3.1 Control articular desacoplado

La posibilidad de implementar un control desacoplado articular, garantiza que gobernando la posición de cada actuador por separado se tendrá el efecto deseado sobre la pose del elemento terminal. Bajo estas consideraciones se propone un esquema de control desacoplado en el espacio articular que se muestra en la Figura 5, donde las señales de referencia de la pose de la plataforma móvil se ingresan al bloque de cinemática inversa, el cual da como salida los valores deseados de las variables articulares del robot, los mismos son comparados con la posición real medida por potenciómetros lineales de ± 0.01 mm de precisión, para generar la señal de error articular que constituyen la entrada a los controladores sintetizados.

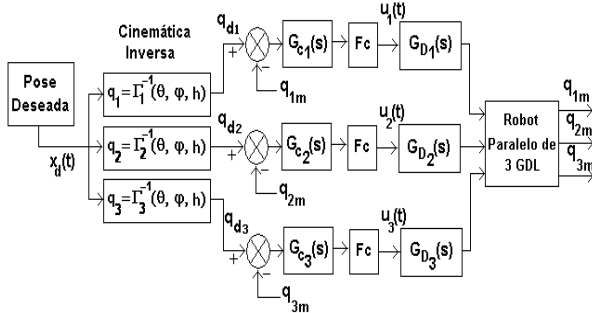


Figura. 5: Esquema desacoplado de control de posición en el espacio articular

El diseño de los controladores (4) y (5) se acompaña de una evaluación de robustez, mediante el análisis de la función sensibilidad del lazo (6). De esta manera se garantiza que los índices de comportamiento obtenidos no se deterioren debido al efecto de la interacción dinámica de los actuadores.

$$S_p^H = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right) \frac{P}{H} = [1 + P(s)K(s)]^{-1} \quad (6)$$

$$\text{siendo: } H(s) = P(s)K(s) [1 + P(s)K(s)]^{-1}$$

La expresión (6) representa la función sensibilidad, que considera la variación que experimenta la salida de lazo cerrado $H(s)$ ante cambios en la función transferencial de la planta $P(s)$.

En la Figura 6 se muestran los valores de magnitud de la misma, donde además se grafican comparativamente las sensibilidades de lazo abierto y lazo cerrado. En dicha figura se puede apreciar que la función sensibilidad alcanza un valor de -38 db para la frecuencia de $\omega = 0.82$ rad/seg, lo cual constituye un valor aceptable de atenuación, sobre todo cuando los valores típicos de frecuencia de trabajo del robot, están por debajo de dicha magnitud en la aplicación práctica industrial.

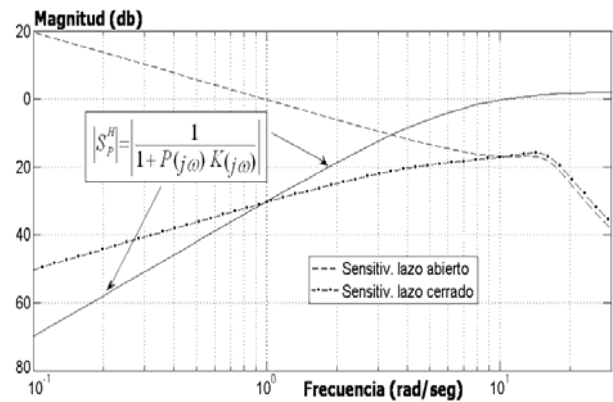


Figura. 6: Diagrama de Bode de la magnitud de las funciones sensibilidad

Con ello queda verificado que el controlador diseñado garantiza la robustez necesaria ante efecto de la interacción dinámica articular.

Se debe garantizar operar el simulador dentro del ancho de banda que evite problemas con la dinámica no modelada en altas frecuencias.

El sistema de control de posición desacoplado es capaz de seguir los valores deseados articulares con cero error en estado estable, logrando cumplir además con el resto de las especificaciones de diseño establecidas (ver Figura 7).

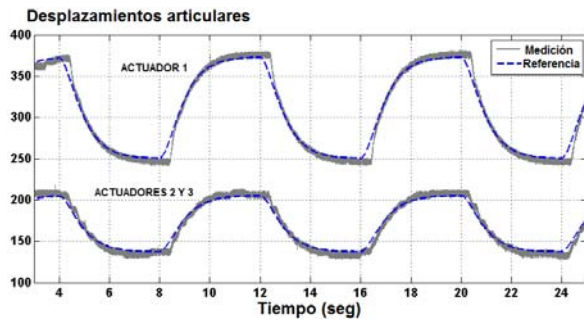


Figura. 7: Resultados de las pruebas experimentales con el control desacoplado articular

El control cinemático en el espacio articular ofrece varias ventajas, es del tipo control desacoplado, la carga computacional es reducida e implementable en el hardware exigido de una aplicación industrial en tiempo real, y a bajos períodos de muestreo. Gracias a los lazos de control articular independientes, el diseño de los reguladores resulta más sencillo, con formulaciones muy similares. La escalabilidad y flexibilidad resultan otras ventajas [20]. No obstante, aparece un error en la ubicación espacial de la plataforma, que se incrementa ante seguimiento de señales de entrada dinámicamente más exigentes. Dicho error no se puede corregir por sí solo con el esquema de control articular

En las gráficas de la Figura 8 se muestran los resultados experimentales que ilustran el error espacial que aparece en la altura de la plataforma móvil, ante señales de referencia de tren de pulsos (posicionamiento) y sinusoidal (seguimiento).

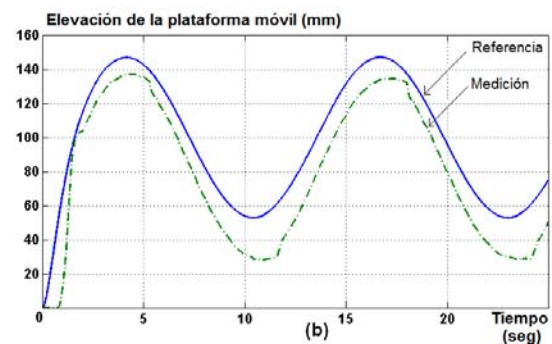
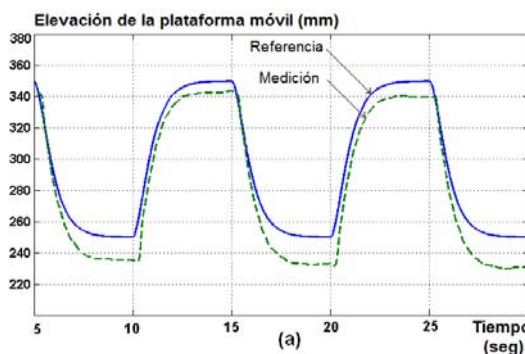


Figura. 8: Errores cartesianos de la plataforma móvil, en posicionamiento (a) y en seguimiento (b).

Por consiguiente, se demuestra que el control desacoplado articular, aún cuando garantiza la robustez necesaria para atenuar el efecto de interacción dinámica articular, no es capaz por sí solo, de ubicar en el espacio cartesiano la plataforma móvil según los requisitos establecidos para el sistema, pues aparecen errores no deseados de ubicación espacial del elemento terminal del robot que resultan incompatibles con la aplicación.

3.2 Control cinemático cartesiano

Dado que la plataforma móvil no es eficazmente ubicada espacialmente solo con el control desacoplado articular, se propone un esquema en cascada en el espacio de tareas, cuyo objetivo es minimizar el error entre la pose deseada y la real de la plataforma móvil en el espacio cartesiano [10]. Es de notar, que en dicha solución de control, no se utiliza el complejo modelo dinámico del sistema robótico, sino que en su lugar se emplea, el modelo dinámico de los actuadores del robot, debidamente obtenido mediante identificación experimental con la planta real (ver sección 2.2).

El control cartesiano difiere del articular, en que el error regulado resulta de la diferencia entre la pose deseada y la real del elemento terminal, lográndose un mejor desempeño del robot sobre todo en aplicaciones de control de movimiento y seguimiento de trayectorias. En este caso se introduce una arquitectura de doble lazo en cascada, según el esquema mostrado en la Figura 9.

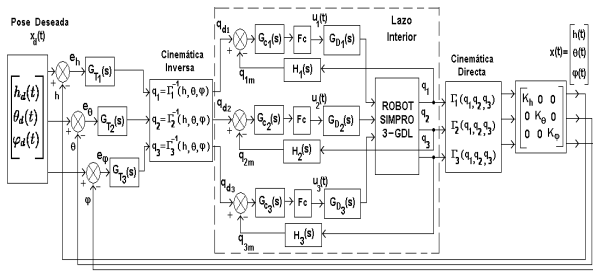


Figura. 9: Esquema de control cinemático en el espacio de tareas.

Bajo dicho esquema de control, se diseña un controlador cuya señal de mando $u(t)$ garantiza que las coordenadas generalizadas que definen la pose del elemento terminal $x(t)$ en el espacio de tareas, sigan lo más fielmente posible el valor deseado de posición espacial $x_d(t)$, minimizando con ello el error de posicionamiento espacial $e_x(t)$, definido por:

$$e_x(t) = x_d(t) - x(t) = [e_h \ e_\theta \ e_\varphi]^T \quad (7)$$

$$e_x(t) = [h_d(t) \ \theta_d(t) \ \varphi_d(t)]^T - [h(t) \ \theta(t) \ \varphi(t)]^T \quad (8)$$

La señal de mando en cada instante de tiempo generada por el controlador del lazo exterior, ubica la pose de la plataforma móvil en dirección tal, que el error (7) tiende a cero, donde la ley de control garantiza:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [e_h \ e_\theta \ e_\varphi]^T = 0 \quad (9)$$

En la Figura 10, el lazo interior actúa como control de posición articular, siendo diseñado para cumplir con las especificaciones de diseño y con la capacidad de atenuar los efectos indeseables de interacción dinámica articular (ver sección 3.1). El lazo exterior (control cinemático en el espacio de tareas), tiene la función de compensar el error cartesiano que aparece debido a las imprecisiones del modelo, tolerancias, juego libre de las uniones, variaciones en la carga, etc., con lo cual se minimiza el error de posicionamiento espacial del robot.

Para evitar el cálculo en línea de la cinemática directa, se emplea un sistema sensorial exteroceptivo que posibilita la medición directa y en tiempo real de las coordenadas espaciales que definen la ubicación de la plataforma móvil [24].

Con el doble lazo en cascada propuesto, se logran mejoras en el desempeño del sistema en relación al posicionamiento de la plataforma móvil. El comportamiento del sistema es superior al caso del control

desacoplado articular, donde el error en estado estable es cero, lográndose una respuesta transiente que cumple con las especificaciones de diseño (ver Figura 10).

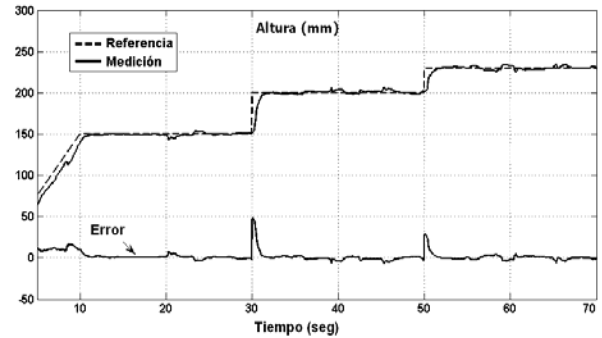


Figura. 10: Variaciones en la altura del robot con cero error de posición con el control cartesiano

El esquema de control permite la inclusión de una compensación lineal de realimentación directa (feedforward compensation) para mejorar el comportamiento del sistema en aplicaciones de seguimiento de trayectoria, en caso que se desee garantizar un buen seguimiento a señales de referencia de mayores exigencias dinámicas.

3.3 Control cinemático cartesiano con realimentación directa

La incorporación de una trayectoria de realimentación directa de la señal deseada de entrada, se efectúa con el objetivo de que el lazo de control sea capaz de seguir una señal de trayectoria deseada, cumpliéndose que $dx(t)/dt = dx_d(t)/dt$, es decir el sistema cancela los efectos de los disturbios y estabiliza los errores dinámicos de seguimiento [3], [12].

De acuerdo a las prestaciones del simulador de movimiento industrial, se desea que sea capaz de seguir fielmente trayectorias generadas por el mundo virtual, donde la plataforma móvil no solo debe seguir la posición deseada, sino también su derivada, es decir, la velocidad deseada.

El sistema de control será implementado en un controlador digital, y el diseño del regulador se efectúa en el dominio discreto, donde el modelo digitalizado del lazo interior, resulta complejo [25]. Por consiguiente, desde el punto de vista práctico, se procede a simplificar la dinámica del lazo interior, aproximando el mismo por un instante de muestreo del lazo exterior [26], donde el diseño del controlador digital resulta más simple. Bajo dicha consideración se plantea el sistema de control digital equivalente simplificado de la Figura 11.

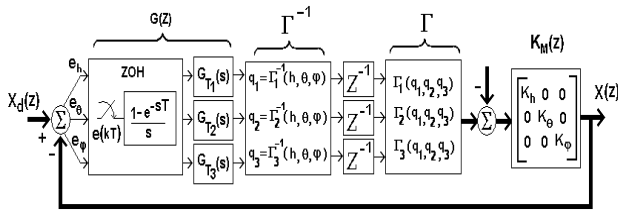


Figura. 11: Esquema de control digital en el espacio cartesiano con aproximación del lazo interior

Donde se cumple:

$$q(k) = q_d(k-1); \quad \forall \quad k > 0 \quad (10)$$

En el esquema de la Figura 11, el bloque $K_M(z)$ provee información directa de la posición/orientación de la plataforma móvil en cada instante de tiempo, elemento de suma importancia a la hora de implementar el esquema de control cartesiano propuesto.

Para ello se implementa un sistema sensorial exteroceptivo que opera en tiempo real, compuesto por unidad inercial de medición y encoders ópticos, que garanticen disponer de la información de la posición y orientación acerca de la ubicación espacial de la plataforma móvil en cada instante de tiempo y con bajas razones de muestreo [24].

Dado que la arquitectura de control en el espacio de tareas resulta, por generalidad, más eficaz que la articular en aplicaciones de control de movimiento y seguimiento de trayectorias [27], se procede a emplear el esquema de control simplificado de la Figura 12, incorporándose una trayectoria de realimentación directa, con el objetivo de incorporar al sistema robótico la capacidad de seguimiento de trayectoria.

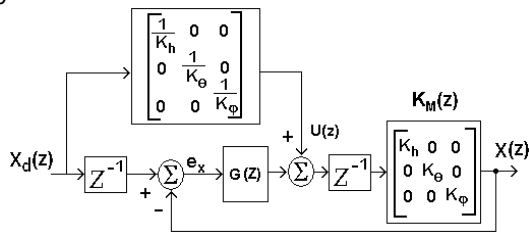


Figura. 12: Esquema de control digital en el espacio cartesiano para seguimiento de trayectoria

El lazo de realimentación directa es responsable de reducir y eliminar los errores de seguimiento, mientras que el lazo de retroalimentación externa garantiza la estabilidad del sistema en su conjunto.

Dado que, se busca que el error de posicionamiento espacial sea cero en estado estable, se define la ley de control siguiente:

$$U(z) = K_I \left(\frac{z^{-1} X_d(z) - X(z)}{1 - z^{-1}} \right) + X_d(z) \frac{1}{K_M(z)} \quad (11)$$

Donde K_I es la matriz de ganancia integral:

$$K_I = \begin{bmatrix} K_{I1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

La señal que recibe el controlador del lazo exterior, considera el incremento a efectuar en las coordenadas cartesianas del robot, como resultado de la medición directa de la posición/orientación de la plataforma móvil.

Dado que las relaciones entradas-salidas del sistema sensorial exteroceptivo, presentan comportamiento lineal, la matriz de medición queda como:

$$K_M = \begin{bmatrix} K_h & 0 & 0 \\ 0 & K_\theta & 0 \\ 0 & 0 & K_\varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

En el lazo exterior se implementa un controlador integral, diseñado para un período muestreo de 60 ms, cuya función transferencial digital $G(z)$, resulta:

$$G(z) = A_0 \frac{0.06 K_I z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \quad (14)$$

El término A_0 se emplea como factor de atenuación para reducir el efecto de posibles cambios bruscos a la entrada del sistema, debido a variaciones en la señal de referencia de posición $X_d(z)$.

3.4 Simulación del sistema de control

Para comprobar el desempeño del sistema, se procede primeramente a efectuar la simulación del sistema, para después proceder con las pruebas experimentales.

Durante la simulación se emplea el modelo CAD del robot desarrollado en Adams®, que es exportado hacia el Matlab/Simulink, desarrollándose un procedimiento de cosimulación. En el lazo exterior se implementa la ley de control (10), mientras que en el lazo interior (control desacoplado articular), se consideran las ecuaciones (4) y (5) para los controladores de cada lazo respectivamente.

En la Figura 13 se observan los resultados arrojados por la simulación conjunta Matlab-Adams®,

para el caso particular de los grados de libertad de ladeo y cabeceo, al someter a la plataforma móvil del robot a seguir trayectorias de referencia sinusoidales.

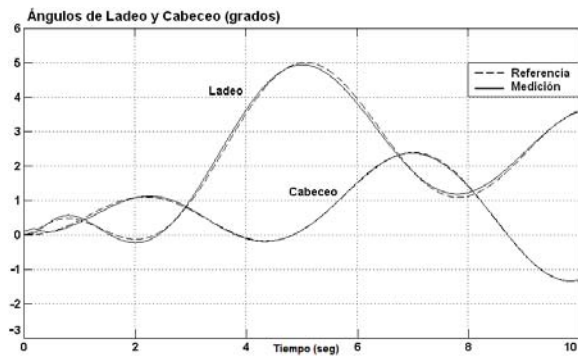


Figura. 13: Simulación en la orientación de la plataforma móvil ante referencias sinusoidales

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales permiten valorar el desempeño del lazo de control en el espacio cartesiano, así como el comportamiento del sistema sensorial implementado, en una aplicación de simulador de movimiento.

En este contexto, se aplican como señales de referencia a seguir por la plataforma móvil, las funciones de entrada definidas por las expresiones (14) y (15) para el ladeo y cabeceo respectivamente, donde los resultados arrojados por las pruebas experimentales se corresponden con las pruebas simuladas.

$$\theta_{ref}(t) = \sin(0.3\omega t) - \sin(\omega t) - 10\sin(1.2\omega t) \quad (15)$$

$$\varphi_{ref}(t) = \sin(0.3\omega t) - \sin(\omega t) + 4\sin(1.2\omega t) \quad (16)$$

En la figura 14 se muestran las curvas de seguimiento obtenidas para los grados de libertad del robot correspondientes al ladeo y cabeceo. Similar comportamiento se obtiene para la elevación.

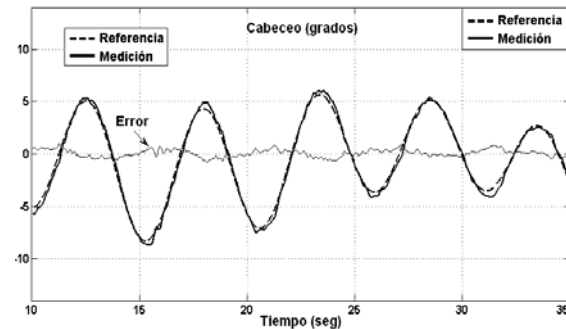
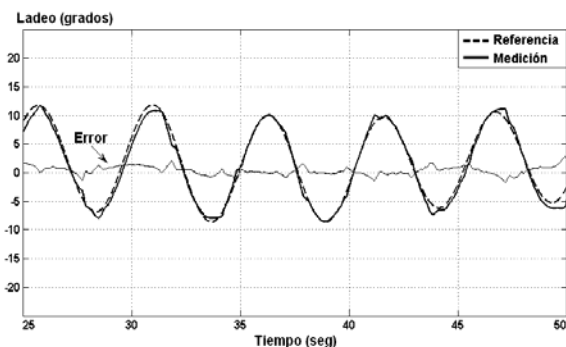


Figura. 14: Resultados experimentales de seguimiento de trayectorias para el ladeo y cabeceo

Las pruebas experimentales muestran el comportamiento estable del sistema, así como la capacidad de la plataforma móvil de seguir con cero errores cartesianos el seguimiento a señales de referencia sinusoidales.

Por otra parte el control articular desacoplado atenúa las perturbaciones de que producen debido a la interacción dinámica de los actuadores, mientras que el lazo exterior estabiliza los errores dinámicos de seguimiento que se presentan.

El esquema de control provee flexibilidad de modificar el controlador del lazo exterior sin alterar el interior y viceversa, buscando efectuar un control dirigido a otros objetivos de comportamiento global del sistema, como por ejemplo, control de fuerza, robustez a disturbios, etc

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se expone una solución de esquema cinemático de control en el espacio de tareas de doble lazo en cascada con realimentación de la señal de entrada, que se implementa en un robot paralelo neumático de tres gdl, en aplicación de seguimiento de trayectoria.

Se demuestra como en el esquema propuesto, el lazo interior que actúa directamente como control de posición articular, que cumple las especificaciones de diseño con la capacidad de atenuar los efectos indeseables de interacción dinámica entre los actuadores, en el rango de frecuencias de operación del robot; mientras que el lazo exterior cartesiano, cumple con la función de compensar el error espacial que aparece debido a las imprecisiones del modelo, tolerancias, y variaciones en la carga del robot, minimizando con ello el error de posicionamiento espacial del robot.

Por su parte el lazo de realimentación directa garantiza llevar a cero el error de seguimiento, mejorando las prestaciones del robot ante señales de seguimiento de mayores exigencias dinámicas.

Los experimentos demuestran que el esquema de

control propuesto, garantiza el desempeño requerido del sistema, por lo que constituye una solución factible de control del robot paralelo SIMPRO, en aplicación industrial de simulador de movimiento.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda brindada por el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Simuladores "CID-SIM" gracias al apoyo brindado, y disposición de facilitar los medios técnicos y de cómputo necesarios para el desarrollo de las investigaciones y experimentos que en este trabajo se exponen.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **J. Lenarcic and B. Roth:** "Advances in Robot Kinematics". Mechanisms and Motion. 1st ed. Netherlands: Springer, 2006.
2. **L. Ren and J. K. Mills:** "Comparison of Control Approaches for Tracking Control of a 3 DOF Parallel Robot: Experimental Results", 9th International Conference on Control, Robotics and Vision, ICARCV '06, Singapore, pp. 5-8, Dec-2006.
3. **F. Wobbe, M. Kolbus, and W. Schumacher:** "Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots," InTech Education and Publishing: Automation and Robotics, vol. 1, (2), pp. 17-40, 2008.
4. **Merlet, Jean Pierre:** "Parallel Robots ", 2nd Ed. Springer, France, 2006.
5. **L. Rolland:** "Synthesis of the Forward Kinematics Problem Algebraic Modeling for the General Parallel Manipulator Displacement-based Equations," Advanced Robotics, vol. 21, (9), pp. 1071-1092, 2007.
6. **Chiew, Y., Jalil, M., Hussein, M.:** "Motion Cues Visualisation of a Motion Base for Driving Simulator ". IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO 2008. Bangkok, Thailand, pp. 1497-1502, 2008.
7. **Campos, A., y otros:** "An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform". International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France, pp. 3705-3710, 2008.
8. **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. Auckland, New-Zealand, pp. 515-520, 2008.
9. **Hayes, M., Langlois, R. G:** "Atlas Motion Platform Generalized Kinematic Model ". 2nd International Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms, Montpellier, France, pp. 227-234, 2008.
10. **Izaguirre, E:** "Control Cinemático en el Espacio de Tareas de Robot Paralelo Neumático en Aplicación de Simulador de Movimiento". Tesis Doctoral, Dpto. Automática, FIE, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2012.
11. **G. Aguirre, et all:** "Kinematics and Dynamic Analyses of a 3 dof Parallel Manipulator by Symbolic Formulations", Proceedings of Multibody Dynamics IDMEC/IST Conference, Lisbon, Portugal, 2003.
12. **L., Y., Yong, W., Zhenghong, C:** "Research on Trajectory Tracking of a Parallel Robot Based on Neural Network PID Control". IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008. Qingdao, China, pp. 504-508, 2008.
13. **C. K. Chen and J. Hwang:** "Iterative Learning Control for Position Tracking of Pneumatic Actuated X-Y Table", IEEE International Conference on Control Applications, Taipei, China, 2004.
14. **Hua-Yi, C., Kuo-Hua, C:** "A Real-Time NURBS Motion Interpolator for Position Control of a Slide Equilateral Triangle Parallel Manipulator ". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34 (4), pp.724-735, 2007.
15. **Staicu, S:** "Recursive Modelling in Dynamics of Agile Wrist Spherical Parallel Robot". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25 (2), pp. 409-416, 2009.
16. **Taghirad, H. D., Nahon, M. A:** "Dynamic Analysis of Redundantly Actuated Parallel Manipulator", Advanced Robotics, 22 (4), pp. 949-981, 2008.
17. **Kolbus, M., Wobbe, F., Schumacher, W:** "Enhanced Motion Control Concepts on Parallel Robots", 11th Edition. InTech. Institute of Control Engineering, Germany, 2008.
18. **M.J.D. Hayes and R. G. Langlois:** "Atlas Motion Platform Generalized Kinematic Model," 2nd International Workshop on Fundamental Issues and Future Research for Parallel Mechanisms and Manipulators, Montpellier, France, 2008, pp. 227-234.
19. **Izaguirre, E., y otros:** "Análisis Cinemático y Control Articular aplicado a Simulador de Mov. de Estructura Paralela", Informática-2011, Palacio de Convenciones. Habana, Feb. 7-11, 2011.
20. **Izaguirre, E., y otros:** "Control Desacoplado de Plataforma Neumática de 3-gdl utilizada como Simulador de Movimiento". Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 8 (4), pp.345-356, 2011.
21. **Izaguirre, E. y otros:** "Análisis Cinemático y Control Articular Aplicado a Simulador de Movimiento de Estructura Paralela". Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 32 (3), pp.1-12, 2011.
22. **Izaguirre, E.; Hernández, L.; Moya, J. L.**

and Guerra, J. A: "Kinematics and Dynamic Modeling of Motion Platform", Proceedings of the Cuba-Flanders Workshop on Machine Learning and Knowledge Discovery, Cuba, Feb. 3 -5, 2010.

23. E. Rubio, L. Hernandez, R. Aracil, R. Saltaren, and J. Guerra: "Implementation of Decoupled Model-Based Controller in a 2-DOF Pneumatic Platform used in Low-Cost Driving Simulators," in Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Morelos, Mexico, 2009.

24. Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E., Urquijo, O: "Cartesian Control of a 3-DOF Electropneumatic Actuated Motion Platform with Exteroceptive Pose Measurement", Int. Journal of Advanced Robotic Systems, 8, (4), pp. 120-128, 2011.

25. Takashi, M., et all.: "Development of a Digital Control System for High-performance Pneumatic Servo Valve". Precision Eng., 31 (2), 156-161, 2007.

26. Hernández, L., Izaguirre, E., Rubio, E., Urquijo, O.: Kinematic Task Space Control Scheme for 3-DOF Pneumatic Parallel Robot. Intelligent Mechatronics: Chapter V. 1st Edition, InTech, Vienna, Austria, pp. 67-84, 2010.

27. Jun, J., Kanaoka, K., Kawamura, S: "Cascaded Feedback Control Scheme for Trajectory Tracking of Robot Manipulator Systems with Actuator Dynamics". Advanced Robotics, 24 (5-6), pp. 879-902, 2010.

8. SÍNTESIS CURRICULARES DE LOS AUTORES

Eduardo Izaguirre Castellanos: se gradúa como especialista en Control Automático en el año 1985 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas -UCLV-, en 1997 obtiene el título de Máster en Automática y en el 2012 el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Actualmente se desempeña como profesor auxiliar del Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la UCLV. Es miembro del Grupo de Automática Robótica y Percepción -GARP-, donde desarrolla su línea de investigación en el campo del modelado, simulación y control de estructuras robóticas paralelas, en aplicaciones industriales de simulador de movimiento.

Dirección postal: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Dpto. Automática. Carretera a Camajuani Km 5 ½ CP: 54830.

Correo: izaguirre@uclv.edu.cu