

Control de trayectoria en el espacio cartesiano de robot paralelo de 2GDL usando modelo cinemático vectorial.

Orlando Urquijo Pascual, Eduardo Izaguirre Castellanos, Luis Hernández Santana

RESUMEN / ABSTRACT

En este artículo, se implementa un esquema de control en espacio de tareas para un robot paralelo neumático de dos grados de libertad en aplicación industrial de simulador de movimiento con el objetivo de resolver el problema de seguimiento de trayectoria. El sistema de control considera dos lazos en cascada; mediante un lazo interno desacoplado se resuelve el control de posición articular, mientras que un lazo externo implementado en el espacio cartesiano, brinda la solución al problema de seguimiento de trayectoria. La entrada deseada cartesiana es prealimentada de acuerdo a las condiciones especificadas en la implementación digital del control cinemático en espacio de tareas. Se emplea el modelo cinemático vectorial sin necesidad del uso del modelo dinámico del robot. Para demostrar el desempeño del esquema de control propuesto, se presentan los resultados experimentales obtenidos a través de varios experimentos realizados con el robot paralelo de dos grados de libertad accionado neumáticamente. Estos resultados confirman la respuesta esperada ante seguimiento de trayectoria demostrando un buen desempeño del sistema.

Palabras claves: Robot paralelo, control de trayectoria, control en espacio de tareas

In this paper, the kinematic task space control scheme of 2DOF pneumatic parallel robot is developed in order to solve the trajectory tracking problem in industrial application of motion simulator. The control system take into account a two loops cascade, an internal loop that solves the decoupled joint control and the external loop implemented in the task space control in order to solve de trajectory tracking specifications. The kinematic model by vectorial formulation is used without the need of a dynamic model of a robot. In order to solve the trajectory tracking problem, the desired input is feed-forwarded according to the specific condition of the digital implementation in the kinematic task space control scheme. To illustrate the performance of the proposed control scheme, experimental results obtained through several test with the parallel robot of 2 DOF are presented. Experimental results confirm the expected tracking response in the task space, showing adequate performance.

Keywords: Parallel robot, tracking control, task space control.

Tracking task space control of 2DOF parallel robot using vectorial kinematic model

1. -INTRODUCCIÓN

En la campo de la robótica se define el control de seguimiento de trayectoria, al seguimiento de una trayectoria deseada variable en el tiempo dada en el espacio articular $q_d(t)$ o cartesiano $x_d(t)$ y sus sucesivas derivadas dq_d/dt y dx_d/dt o bien d^2q_d/dt^2 y d^2x_d/dt^2 que describen la velocidad y aceleración deseadas respectivamente [1].

El control en el espacio articular tiene como característica que es necesario la solución de la cinemática inversa del robot para obtener el vector de posición articular partiendo de conocer la trayectoria deseada en el espacio cartesiano del elemento terminal del robot, que en el caso del robot bajo estudio, lo constituye la plataforma móvil. Este tipo de control no tiene la capacidad de compensar las incertidumbres del sistema que afectan la trayectoria real de la plataforma móvil en el espacio

cartesiano. Por otra parte, su variante en el espacio de tareas, compensa las incertidumbres existentes pero requiere de la estimación o medición del vector de coordenadas espaciales del elemento terminal del robot [2]. Puesto que la cinemática directa en los robots de estructura paralela generalmente se soluciona mediante algoritmos numéricos, resulta desventajoso su uso en aplicaciones de tiempo de real [3,4]. Bajo estas consideraciones, resulta conveniente controlar la trayectoria del robot en el espacio de tareas puesto que asegura un estado de control *feedback* que conduce a una mejor precisión con respecto al control en el espacio articular [3].

En este artículo se propone una estrategia de control de trayectoria en espacio de tareas para un simulador de movimiento de dos grados de libertad accionado por pistones neumáticos con el objetivo de mejorar el desempeño del esquema de control cartesiano en espacio de tareas en aplicación industrial de seguimiento de trayectoria.

2. -ROBOT PARALELO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

La plataforma de simulación de dos grados de libertad (2 GDL) que se muestra en la Figura 1, es fabricada por la empresa SIMPRO que se dedica a la producción de simuladores industriales de movimiento para disímiles aplicaciones. Su diseño está fundamentalmente enfocado para ser utilizado como simulador de conducción para el adiestramiento de personal y entretenimiento. Por consiguiente, el control de la misma está dirigido a garantizar la correcta ubicación de la plataforma móvil en el espacio cartesiano, de acuerdo a los valores de referencia de un mundo virtual que son visualizados en el interior de la cabina.

2.1. -DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA DE 2 GDL

Este simulador de conducción consta de una cabina con todos los mandos reales a los que se enfrenta un conductor en un vehículo y un monitor a través del cual se puede ver el mundo virtual por el que se mueve. La cabina pivotea sobre una columna central mediante una articulación universal (tipo cardán) y se estabiliza en un plano mediante la acción de dos cilindros neumáticos que ubicados en sus extremos perpendiculares, le imprimen al conductor las sensaciones de ladeo y cabeceo, simulando con ello las pendientes del mundo virtual en que se mueve.



Figura 1

Simulador de movimiento de 2 GDL mostrando las cadenas cinemáticas cerradas neumáticamente actuadas.

Los datos mecánicos más importantes de la plataforma se muestran en la tabla número 1. El origen del sistema de coordenadas cartesianas para las medidas de longitud y ubicación del centro de masa se establece en el pivote central tal como se muestra en la Figura 1.

Tabla 1
Características de la plataforma de 2GDL

Descripción	Valor
Masa total de la cabina	500 kg
Posición del centro (x,y,z)	[0,0,700] mm
Ángulo de cabeceo	-13° a 19°
Ángulo de ladeo	13° a -19°
Distancia del origen a cada cilindro	560 mm

En este robot, cada articulación electro-neumática está formada por un cilindro FESTO DNC-100-320 de desplazamiento lineal que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico, tecnología que se ha venido aplicando en los robots paralelos que requieren de un posicionamiento continuo. Los pistones neumáticos son gobernados por una válvula proporcional de flujo FESTO MPYE-5-3/8, donde la elongación del mismo se mide con el empleo de encoders lineales.

2.2. -MODELADO CINEMÁTICO BASADO EN FORMULACIÓN VECTORIAL

Las relaciones cinemáticas son de gran interés para el estudio de muchas importantes propiedades de las estructuras robóticas como la singularidad, dexteridad, espacio de trabajo, etc., así como también resultan de gran utilidad en la concepción de esquemas de control de posición y seguimiento de trayectorias [4,5,19]. Empleando la formulación vectorial se puede construir un sistema de ecuaciones cinemáticas que contendrá igual número de ecuaciones que de incógnitas, especificándose la expresión vectorial cerrada que pasa por los puntos de unión de las cadenas cinemáticas con la base fija (A_i) y la plataforma móvil (B_i) [6,9].

Para el caso particular de la plataforma de 2 GDL, tenemos que la base fija está compuesta por el triángulo formado por los puntos A_1OA_2 dependiendo solamente de las longitudes fijas denominadas a_1 y a_2 . Por su parte la plataforma móvil está conformada por el plano que forman los puntos B_1PB_2 , siendo única su geometría y solamente dependiente y definida por la longitud de sus bordes b_1 y b_2 , según se muestra en la Figura 2.

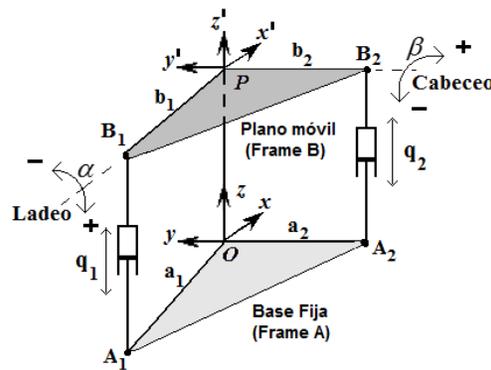


Figura 2

Arquitectura geométrica y notaciones de la plataforma de 2 GDL.

La definición de los orígenes de coordenadas cartesianas en los sistemas de referencia fijo ($Oxyz$) y móvil ($Px'y'z'$) se realiza de acuerdo a trabajos previos publicados relacionados con dicho robot [7]. En tal sentido, se considera ubicar el sistema de referencia móvil coincidente con el centro del triángulo que conforma el elemento terminal del robot (plataforma móvil) la cual es la responsable de soportar la cabina de conducción. El sistema de referencia fijo se coloca en el centro de la base fija ubicada en la parte inferior de la base metálica que soporta toda la estructura de la plataforma, la cual va sólidamente anclada al suelo.

La orientación en el espacio de la plataforma móvil estará determinada por los ángulos de rotación α y β . El ángulo α es el ángulo de rotación alrededor del eje x' del sistema ($x'y'z'$) de coordenadas móviles, el cual da la sensación de cabeceo, mientras que β denota el ángulo de rotación alrededor del eje y' , el cual brinda la sensación de ladeo.

Las relaciones correspondientes a la cinemática inversa permiten calcular las coordenadas articulares a partir de conocer las variables espaciales del robot. En este caso, el modelo cinemático inverso adquiere la forma:

$$q_n = f(\alpha, \beta) \quad n = 1, 2 \quad (1)$$

Por su parte el modelo cinemático directo (2) consiste en calcular la posición y orientación de la base móvil a partir del conocimiento de las variables actuadas articulares del robot. Resulta ser más complejo en este tipo de arquitecturas ya que permite obtener el vector de coordenadas de la base móvil y la matriz de rotación compatibles con las ecuaciones planteadas para cada cadena cinemática activa.

$$\alpha, \beta = f(q_1, q_2) \quad (2)$$

En la plataforma de conducción SIMPRO la solución de la cinemática tanto directa como inversa depende de la longitud del brazo articulado de cada cadena cinemática cerrada. En el caso de la cinemática directa la longitud del brazo articulado es la

variable conocida y las incógnitas son el ángulo α (rotación alrededor del eje x') y el ángulo β (rotación alrededor del eje y') que definen la orientación del elemento terminal del robot. En el caso de la cinemática inversa, la incógnita es el valor de la longitud del brazo actuado, quedando en función de los ángulos en que se quiere orientar el elemento terminal.

Según el esquema de la Figura 2, se puede plantear la siguiente ecuación cerrada vectorial válida para ambas cadenas cinemáticas del robot.

$$\overrightarrow{OA_i} + \overrightarrow{A_i B_i} + {}^A_B \mathfrak{R} \overrightarrow{PB_i} - \overrightarrow{OP} = 0 \quad \forall i = 1, 2 \quad (3)$$

Donde ${}^A_B \mathfrak{R}$ es la matriz de rotación del sistema de referencia móvil (frame B) respecto al fijo (frame A), que permite conocer la orientación de la plataforma móvil. En este sentido se emplean los ángulos de Euler en el convenio ZYX conocido también como "roll-pitch-yaw", donde:

$${}^A_B \mathfrak{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dado que no existe rotación alrededor del eje z, el ángulo de guiñada (ψ) es cero, quedando definida la matriz de rotación como:

$${}^A_B \mathfrak{R} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dado que se requiere obtener la cinemática inversa del robot, se puede expresar (3) en función de la elongación de la articulación activa del robot.

$$\overrightarrow{A_i B_i} = {}^A_B \mathfrak{R} \overrightarrow{PB_i} + \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OA_i} \quad (6)$$

Que expresada en forma compacta queda:

$$\overrightarrow{l_i} = \overrightarrow{b_i} + \overrightarrow{p} - \overrightarrow{a_i} \quad (7)$$

Donde la magnitud de los vectores en (7) se calcula como:

$$p = \overline{OP} = [P_x, P_y, P_z]^T - [O_x, O_y, O_z]^T \quad (8)$$

$$a_i = \|\overline{OA_i}\|_2 \quad (9)$$

$$b_i = \|\overline{PB_i}\|_2 \quad (10)$$

La expresión (6) se puede escribir para cada cadena cinemática de la forma:

$${}^A L_i = {}^A_B \mathfrak{R} {}^B b_i + {}^A p - {}^A a_i \quad (11)$$

Derivando (11) y dado que ${}^A a_i$ y ${}^A p$ son vectores de magnitud constante, se tiene:

$${}^A_{Bi} \mathcal{V} = {}^A_B \dot{\mathfrak{R}} b_i \hat{z}_i + {}^A_B \mathfrak{R} \dot{b}_i \hat{z}_i \quad (12)$$

El término ${}^A_{Bi} \mathcal{V}$ representa la velocidad lineal del punto de pivoteo B_i de cada extremidad activa del robot, referida al sistema referencial fijo (frame A). Esta componente de velocidad es perpendicular al vector unitario que apunta a lo largo de cada uno de los ejes de rotación, según se ilustra en la Figura 3.

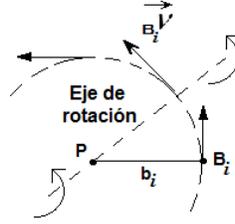


Figura 3

Representación de la velocidad lineal del punto de pivoteo B_i en el sistema de referencial móvil.

La variable \hat{z}_i es el vector unitario que apunta en dirección de L_i .

Multiplicando (12) por ${}^A_B \mathcal{R}^{-1}$, y puesto que la velocidad lineal del vector b_i es cero, tenemos:

$${}^B ({}^A_B \mathcal{V}) = {}^A_B \dot{\mathcal{R}} {}^A_B \mathcal{R}^{-1} b_i \hat{z}_i \quad (13)$$

De acuerdo a lo enunciado respecto a la velocidad angular de un cuerpo rígido [8], se tiene:

$${}^A_B \mathcal{V} = \Omega b_i \hat{z}_i = ({}^A_B \omega \times b_i) \hat{z}_i, \quad \text{siendo } \Omega = {}^A_B \dot{\mathcal{R}} {}^A_B \mathcal{R}^{-1} \quad (14)$$

Donde:

Ω : Matriz simétrica de Skew.

${}^A_B \omega$: Vector de velocidad angular del sistema referencial B respecto al A (velocidad angular de la plataforma móvil).

2.3. -MODELADO Y CONTROL DE LOS ACTUADORES NEUMÁTICOS

Con el propósito de implementar estrategias de control, el modelo dinámico de los robots paralelos es utilizado para el desarrollo del control por dinámica inversa (IDC), sin embargo, la precisión del control está estrechamente relacionada con la exactitud del modelo obtenido [11]. Para evitar el alto costo computacional y las exigencias en la exactitud del modelo que demanda las estrategias de control basadas en IDC, el modelo del sistema electro-neumático es obtenido a través de identificación experimental [12]. La estrategia de control que se presenta basada en el modelo de los actuadores, no requiere el cálculo de la dinámica inversa, lo cual garantiza su fácil implementación en tiempo real con bajos tiempos de muestreo, como es el caso de la aplicación objeto de estudio.

El modelo analítico del actuador lineal electro-neumático, considera el subdimensionamiento de la válvula y las constantes de tiempo del cilindro, de modo que describe con mayor exactitud la dinámica real del sistema [12].

Bajo estas condiciones la función transferencial del sistema electro-neumático, posición $Y(s)$ respecto a acción de control $U(s)$, se define por la expresión:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s(s^2 + 2\varphi\omega_n s + \omega_n^2)} = Gy_u(s) \quad (24)$$

donde ω_n y φ son la frecuencia natural no amortiguada y razón de amortiguamiento del sistema respectivamente, mientras b representa la ganancia del mismo.

La identificación experimental se realiza alrededor del valor de posición central de cada cilindro que es donde se demuestra que el modelo que se obtiene es el que tiene los polos complejos conjugados más próximos al origen del plano del lugar de las raíces, por lo que, sin dudas, es la dinámica más exigente [12].

El modelo obtenido para ambas articulaciones actuadas se supone el mismo y está dado por la expresión:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{4928}{s(s^2 + 1.186s + 88.22)} \quad (25)$$

El regulador del lazo interno, correspondiente al posicionamiento articular, $U(s)/E(s)$ se diseña por el método de asignación de polos y ceros, lográndose un par de polos dominantes de lazo cerrado $q(s)/qd(s)$ con $\omega_n=10$ rad/s y $\varphi=0.7$, donde la estructura general del regulador propuesto [12], se define por la expresión (26).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_e(s+k_i)(s^2+a_1s+a_0)}{s(s+\omega_a)^2} \quad (26)$$

En este contexto, los controladores se diseñan para garantizar en lazo cerrado un par de polos (complejos conjugados) dominantes de manera que satisfagan las especificaciones de tiempo de establecimiento menor o igual a 0.5 segundos para entrada escalón por la referencia, con un mínimo de sobrecresta y error articular no mayor de 3 mm.

3. -PROBLEMA DE CONTROL

El objetivo del esquema de control es el seguimiento de trayectoria en el espacio de tareas del vector de coordenadas espaciales $X_d(t)=[\alpha(t) \beta(t)]^T$ correspondiente a las variables de cabeceo y ladeo del centro de referencia móvil del elemento terminal. Para controlar el estado deseado, se define el error cartesiano $e_x(t)$ medido en el espacio de tareas.

$$e_x(t) = X_d(t) - X(t) = \begin{bmatrix} e_\alpha(t) \\ e_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_d(t) \\ \beta_d(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

La señal de mando generada en cada instante de tiempo, ubica la pose de la plataforma móvil en dirección tal, que el error $e_x(t)$ tiende a cero, por consiguiente, la ley de control garantiza:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \end{bmatrix}^T = 0 \quad (28)$$

En este caso en particular, se asume que para el problema de control de trayectoria, el error inicial se considera cero, o sea, lo suficientemente pequeño para que exista una configuración articular (q_d) para cada configuración en el espacio de tareas $X_d = X(q_d)$. Esta condición asegura que el problema de control pueda ser solucionado.

El esquema general consiste en un control por realimentación simple con compensación directa el cual se representa en la Figura 4, donde la función transferencial A/B representa el modelo de la planta y C/D corresponde a la función de transferencia del regulador [13]. En el esquema la parte de realimentación directa es la encargada de la estabilidad de todo el sistema y se presenta como control cinemático en espacio de tareas. La compensación por adelanto de señal, calculada a partir del inverso de la planta, reduce el error de seguimiento de trayectoria [20]. De manera general, la ley de control requiere generar una trayectoria deseada la cual se obtiene fácilmente desde el mundo virtual del simulador.

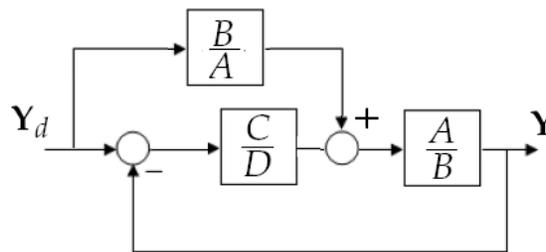


Figura 4.

Esquema general de control de Trayectoria en Espacio de Tareas.

3.1. -CONTROL CINEMÁTICO EN EL ESPACIO DE TAREAS

El control cinemático en el espacio de tareas consiste en la combinación de un lazo de control articular en cascada con un lazo de control cartesiano para garantizar el posicionamiento de las variables espaciales del elemento final o plataforma móvil del robot paralelo de dos grados de libertad [10]. El mismo constituye el lazo de realimentación simple del esquema propuesto en la sección anterior. El esquema propuesto se muestra en la Figura 5.

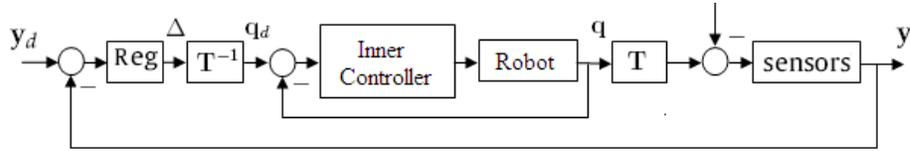


Figura 5

Esquema de Control Cinemático en Espacio de Tareas.

El problema de control es formulado como el diseño de un controlador que genere un mando Δ que provoque un movimiento del robot de forma tal que la posición deseada en el espacio de tarea sea alcanzada, siguiendo un índice de funcionamiento deseado. La posición deseada de las articulaciones q_d no está disponible, no obstante, dicho valor se puede obtener como resultado de la señal de mando Δ y la solución del problema cinemático inverso, dado por la ecuación (1).

El lazo de control articular constituye un lazo de arquitectura abierta en el cual es posible implementar cualquier tipo de regulador o estrategia de control [14,15]. El efecto dinámico del lazo interior es independiente del externo; donde en condición estable de operación, el control de posición en el espacio articular satisface la expresión:

$$q(t) = q_d(t) \cong 0 \quad \forall t \geq 0 \tag{29}$$

En tal caso, el diseño digital del controlador externo se efectúa considerando que la dinámica del lazo interior puede ser aproximada por uno o dos instantes de muestreo del lazo exterior, por lo que la igualdad (29) se modifica por (30).

$$q(k) = q_{d(k-1)} \quad \forall k \geq 0 \tag{30}$$

Bajo esta consideración, se plantea el sistema de control digital equivalente simplificado, que se muestra en la Figura 6.

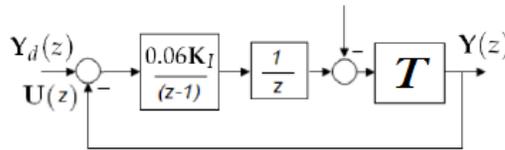


Figura 6

Esquema de control simplificado.

El controlador digital se selecciona para una ganancia de $K_I = 0.1$ ya que los valores de respuesta transitoria ante entrada paso son satisfactorios para esta ganancia y un periodo de muestreo de 60 ms, obteniéndose una respuesta sobreamortiguada [10]. Las coordenadas en el espacio de tareas son obtenidas a través del cálculo de la cinemática directa.

3.2. -IMPLEMENTACIÓN DE COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL

El esquema de control cinemático en espacio de tareas no es capaz de suprimir los errores en cuanto a seguimiento de trayectoria cuando el sistema es excitado con una señal sinusoidal. Para eliminar este error, es necesario implementar la compensación por adelanto de señal de la Figura 4, calculándose a partir del inverso de la planta B/A .

Teniendo en cuenta la aproximación dinámica realizada del lazo interno de la cascada del esquema de control cartesiano en espacio de tareas, a un instante de muestreo del lazo externo, la función transferencial B/A correspondiente al esquema de control propuesto para eliminar los errores en seguimiento de trayectoria adquiere la forma:

$$\frac{B}{A} = \begin{bmatrix} \frac{z}{K_\alpha} & 0 \\ 0 & \frac{z}{K_\beta} \end{bmatrix} \tag{31}$$

Donde K_α y K_β son las ganancias resultantes de la solución de la cinemática directa para el cálculo de las variables del espacio de tareas. A partir de esto, el esquema de control para seguimiento de trayectoria queda de la forma que se presenta en la Figura 7.

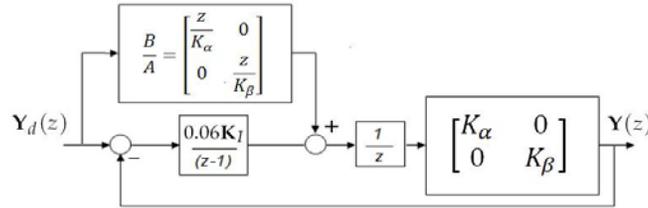


Figura 7

Esquema de control propuesto para seguimiento de trayectoria.

El mando que proporciona la parte por adelantado de señal del esquema de control de la Figura 7 necesita generar la señal dada por $ZY_d(z)$, lo cual resulta físicamente imposible de obtener ya que corresponde a una señal de un instante de muestreo futuro. Por otra parte si la señal de referencia de entrada es retardada un instante de muestreo Z^{-1} y la señal de lazo por adelantado de señal se toma antes del retardo como se muestra en la Figura 8, un efecto similar se obtiene y el esquema de control resulta realizable.

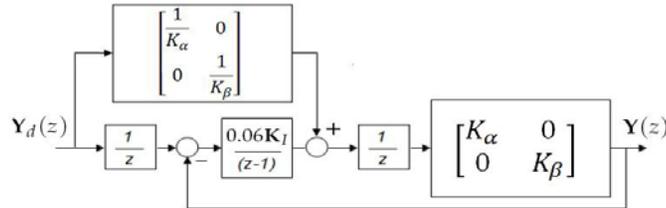


Figura 8

Esquema de control implementado para seguimiento de trayectoria.

4. -RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los lazos de control interno y externo de la plataforma neumática de dos grados de libertad, son implementados utilizando una computadora Pentium-D 3.00-GHz conectada al robot a través de una tarjeta de adquisición de datos Humusoft MF624. La tarjeta se encarga de adquirir la lectura de los potenciómetros lineales, sensores encargados de transmitir la elongación de cada pistón, y a su vez, transmite a las electroválvulas del sistema neumático, con un período de muestreo de 1 ms, las señales de control que se generan en la PC. Las variables del espacio cartesiano son calculadas a partir de la solución del problema cinemático directo en tiempo real. En el lazo externo se resuelve el problema cinemático inverso para generar las elongaciones deseadas de los pistones q_d . Los algoritmos de control son implementados utilizando MATLAB/Simulink empleando el Real-Time Windows Target.

Se desarrollan varios experimentos en la plataforma real acorde al esquema de control de la Figura 5, excitando el pistón con una señal sinusoidal para generar el ladeo en la plataforma móvil. El valor de las variables cartesianas es calculado a partir de la solución del modelo cinemático directo del robot. El comportamiento del ladeo y el error con respecto a la referencia se muestra en la Figura 9.

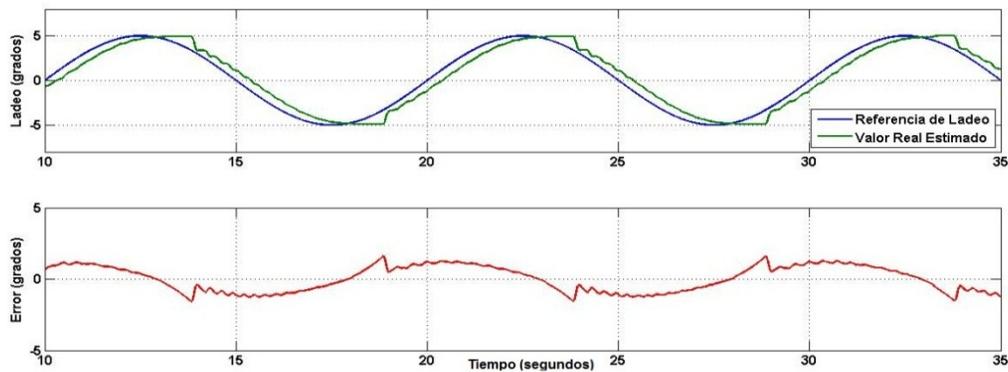


Figura 9

Comportamiento del ladeo con esquema de control cartesiano en espacio de tareas.

Según se observa en la Figura 9, el esquema de control cartesiano en espacio de tareas es incapaz de cumplir con los requerimientos en aplicaciones de seguimiento de trayectoria cuando se excita el sistema con una entrada sinusoidal, persistiendo un error de aproximadamente de dos grados en su valor máximo.

En la Figura 10, se muestra el comportamiento del ladeo de la base móvil de la plataforma, en esta ocasión utilizando el esquema de control de trayectoria en espacio de tareas propuesto en la Figura 8. En la figura se evidencia una reducción considerable del error de seguimiento ante la misma entrada sinusoidal del experimento anterior.

De manera similar a otros sistemas electro-neumáticos reportados en la literatura [16-18], la principal fuente de error está relacionada con la fricción de Coulomb, en el momento en que la velocidad del robot es cero, antes de que su velocidad cambie de dirección, además del efecto de la zona muerta que experimentan las válvulas de control de flujo utilizadas en el sistema electro-neumático.

La solución propuesta logra reducir el error de seguimiento de trayectoria de la plataforma móvil del robot paralelo en la aplicación industrial de simulador de movimiento. Con el doble lazo en cascada, se resuelve gracias al lazo interior el control articular desacoplado, mientras que con el lazo exterior se disminuye el error de seguimiento espacial de la plataforma, el cual es minimizado mediante la introducción de una señal de prealimentación, que garantiza un mejor desempeño del sistema en su conjunto en seguimiento de trayectoria. En la propuesta se emplea el modelo cinemático vectorial prescindiendo del modelo dinámico del robot, contribuyendo a la factibilidad de implementación de los algoritmos de control sobre hardware de bajo costo con exigencias de tiempo real.

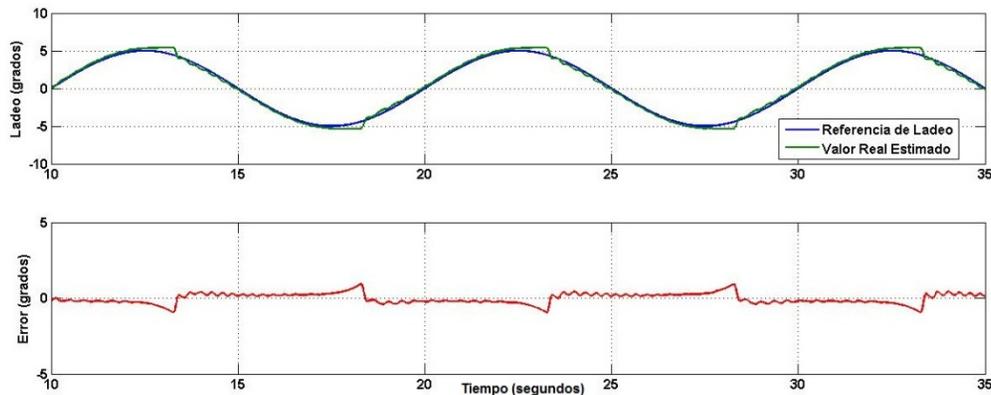


Figura 10

Comportamiento del ladeo con esquema de control de trayectoria en espacio de tareas.

Los índices de desempeño del sistema se mantienen, incorporándose la mejora en la capacidad de movimiento espacial de la plataforma móvil ante seguimiento de trayectoria, minimizándose el error en estado estable.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la implementación de un esquema de control cinemático en espacio de tareas para un robot paralelo de dos grados de libertad. El esquema se estructura en dos lazos en cascada, donde el lazo interno es el encargado del control de las variables articulares del robot y el lazo externo elimina los errores cartesianos en el espacio de tareas.

Con el objetivo de resolver el problema de seguimiento de trayectoria de este esquema, se realiza una compensación por adelanto de señal de la entrada de acuerdo a las especificaciones del control digital en la implementación del control cinemático en espacio de tareas. El efecto dinámico del lazo interno se aproxima a un retardo de tiempo del lazo externo debido a que el lazo de control interno se diseña más rápido que el externo.

Los resultados experimentales evidencian como el esquema propuesto de control de trayectoria en espacio de tareas, cumple con los requisitos de diseño relativos al error articular, mínimo de sobrecresta y tiempo de asentamiento, logrando adicionalmente disminuir el error en seguimiento de trayectoria, para la aplicación de simulador de movimiento industrial.

REFERENCIAS

1. Wankyun Ch, Li-Chen F, Su-Hau H. Motion Control. In: Siciliano B, Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Berlin: Springer; 2016. p. 133-159.
2. Dongya Z, Shaoyuan L, Quanmin Z. Adaptive synchronised tracking control for multiple robotic manipulators with uncertain kinematics and dynamics. *International Journal of Systems Science*, 2016; 47(4):791-804.
3. Jean-Pierre M. On the real-time calculation of the forward kinematics of suspended cable-driven parallel robots. 14th IFToMM World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Taipei, Taiwan, 2015.p. 25-30.
4. Vaida C, Pisla D, Covaciu F, Gherman B, Pisla A, Plitea N. Development of a control system for a HEXA parallel robot. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca; Romania; 2016.p.19-21.
5. Kilicaslan S. Tracking control of elastic joint parallel robots via state-dependent Riccati equation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2015; 23(2):522-538.
6. Jiang X, Gosselin C. Trajectory Generation for Three-Degree-of-Freedom Cable-Suspended Parallel Robots Based on Analytical Integration of the Dynamic Equations. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2016; 8(4):041001.
7. Waldron K, Schmiedeler J. Kinematics. In: Siciliano B, Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Berlin: Springer; 2016. p. 9-33.
8. Lu Y, Li X, Zhang C, Liu Y. Analysis of kinematics and statics for a novel 6-DoF parallel mechanism with three planar mechanism limbs. *Robotica*. 2016; 34(04):957-972.
9. Altuzarra O, Diez M, Corra J, Teoli G, Ceccarelli M. Kinematic Analysis of a Continuum Parallel Robot. In *New Trends in Mechanism and Machine Science*. Switzerland: Springer International Publishing; 2017. p. 173-180
10. Izaguirre-Castellanos E. Control cinemático en el espacio de tareas de robot paralelo neumático en aplicación de simulador de movimiento. Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas; 2012. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/312234230_Control_Cinemático_en_el_Espacio_de_Tareas_de_Robot_Paralelo_Neumático_en_Aplicación_de_Simulador_de_Movimiento.
11. Díaz-Rodríguez M, Valera A, Mata V, Valles M. Model-based control of a 3-DOF parallel robot based on identified relevant parameters. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2013; 18(6):1737-1744.
12. Rubio A, Hernández L, Aracil R, Saltarén R, Guerra JA. 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; México; 2009.p. 22-25.
13. Chemori A, Natal GS, Pierrot F. Control of parallel robots: towards very high accelerations. *SSD'2013: 10th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Hammamet; Tunisia; 2013.p.18-21.
14. Izaguirre E, Hernández L, Rubio E, Urquijo O. Cartesian Control of a 3-DOF Electro-pneumatic Actuated Motion Platform with Exteroceptive Pose Measurement. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2011; 8(4):120-128.
15. Hernández L, Izaguirre E, Rubio E, Urquijo O. Kinematic Task Space Control Scheme for 3-DOF Pneumatic Parallel Robot. *Intelligent Mechatronics*; 1st Edition. Vienna: InTech Education and Publishing; 2011. p. 67-84.
16. Syed N, Mohd FR, Ahmad' Athif MF, Zool HI, Noorhazirah S. Position Control of Pneumatic Actuator Using Self-Regulation Nonlinear PID. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014; 2014(3):1-12.
17. Pršić D, Nedic N, Stojanovic V. A nature inspired optimal control of pneumatic-driven parallel robot platform. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017; 231(1):59-71.
18. Díez JA, Badesa FJ, Lledó LD, Sabater JM, García-Aracil N, et al. Design and Development of a Pneumatic Robot for Neurorehabilitation Therapies. *Second Iberian Robotics Conference*. Lisbon; Portugal; 2015.p.315-326.
19. Milanés Herмосilla, D. and A. Castilla Pérez. "Generación de trayectorias para el brazo robótico (ArmX)." *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2016; 37(3):58-71.
20. González-Rodríguez, R. y Santana, L. H. "Control monocular 3D dinámico basado en imagen". *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2011; 32(2):15-30.

AUTORES

Orlando Urquijo Pascual, Ingeniero en Automática (2009), Master en Automática y Sistemas Informáticos (2014), Profesor Auxiliar del Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Miembro del Grupo de Investigaciones de Automática, Robótica y Percepción (GARP-UCLV). Cuba. Correo: orlandop@uclv.edu.cu

Eduardo Izaguirre Castellanos, Dr. C. Profesor Titular del Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Miembro del Grupo de Investigaciones de Automática, Robótica y Percepción (GARP-UCLV). Cuba. Correo: izaguirre@uclv.edu.cu

Luis Hernández Santana, Dr. C. Profesor Titular del Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Miembro del Grupo de Investigaciones de Automática, Robótica y Percepción (GARP-UCLV). Cuba. Correo: luishs@uclv.edu.cu



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License