

Control de Seguimiento de Trayectoria en el Espacio Operacional de Robot Manipulador Actuado por Motores de Inducción

TORRES DEL CARMEN, Felipe^{i†}, GUERRERO-RAMIREZ, Gerardoⁱⁱ, MONTES-RENDÓN, Azucenaⁱ, MOTA-CRUZ, Juan Estebanⁱⁱⁱ, GONZÁLEZ-HUITRÓN, Víctorⁱ

ⁱ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlalpan

ⁱⁱ Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ⁱⁱⁱ Universidad Politécnica del Estado de Guerrero

Recibido: 4 de Septiembre, 2017; Aceptado 7 de Diciembre, 2017

Resumen

Este trabajo trata con el control de seguimiento de trayectoria en el espacio operacional de un robot manipulador actuado por motores de inducción con disponibilidad del espacio total del estado del sistema. El par requerido por el robot manipulador es considerado como el par de carga para los motores de inducción. La ley de control se ha diseñado en base a la metodología de Lyapunov para mantener convergencia global y asintótica de los errores de seguimiento en su respuesta en lazo cerrado. Las simulaciones realizadas con parámetros reales, obtenidos de hojas de datos, muestran que el controlador propuesto logra el seguimiento de la trayectoria deseada en un tiempo finito.

Abstract

This paper deals with the tracking control on the operational space of a robot manipulator driven by induction motors in the case where the full state-space is available. The required torque for the robot manipulator is used to be the load torque for the induction motor. The control law has been designed based on the Lyapunov methodology to yield global asymptotic convergence of the tracking closed-loop errors. Simulations with real parameters taken from data sheets show that the controller reaches the tracking of the desired trajectory in a finite time.

Robot Manipulador, Seguimiento de Trayectoria, Diseño de Lyapunov, Motor de inducción

Robot Manipulador, Tracking Control, Lyapunov Design, Induction Motor

Citación: TORRES-DEL CARMEN, Felipe de Jesús[†], MONTES-RENDÓN, Azucena, MOTA-CRUZ, Juan Esteban, GONZÁLEZ-HUITRÓN, Víctor. Control de seguimiento de trayectoria en el espacio operacional de robot manipulador actuado por motores de inducción. Revista del Diseño Innovativo. 2017 1-1: 1-9

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: felipetorres6@hotmail.com

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los robots manipuladores industriales comúnmente utilizan motores de corriente directa (CD) tipo sin escobillas (*brushless*) como actuadores. Los imanes permanentes que requieren estos motores, los hacen costosos en su inversión inicial así como en el mantenimiento preventivo que debe realizarse.

Una alternativa para reducir estos costos en los actuadores, ha sido el uso de motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla. Los motores de inducción (MI) tienen la ventaja de brindar un alto par de salida, bajo costo de inversión inicial y prácticamente nulo mantenimiento. Su desventaja se aprecia en la alta no linealidad de su dinámica que dificulta el control en tareas de seguimiento de trayectoria, en particular en el espacio operacional o de trabajo.

En (Hu, Dawson y Qian, 1996) se describe un controlador adaptable de seguimiento de posición de una articulación por realimentación de estado parcial en el espacio de articulación, sin mediciones del flujo del rotor.

En (Seleme, 1999) se estudia el control de robots manipuladores rígidos conducidos por motores de inducción en el espacio de articulación. Incluyeron la dinámica total del sistema en el diseño del controlador para el seguimiento de la trayectoria eléctrica y mecánica de un robot manipulador rígido de 2 grados de libertad (g.d.l.).

En (Guerrero-Ramírez y Tang, 2001) se ataca el problema del control descentralizado de robots rígidos actuados por motores de inducción por alimentación de corriente, en el espacio de articulación. Así también, en (Hsu y Fu, 2005) se trata con el control descentralizado adaptable de robots manipuladores actuados por MI por alimentación de corriente.

Se acoplaron los motores de inducción como actuadores de las 3 articulaciones de un robot PUMA 560, en el espacio de articulación.

En (Diniz et al., 2012) se controla un robot planar de dos grados de libertad, actuado por motores de inducción trifásicos bajo un control de modos deslizantes, en el espacio de articulación.

En todos los trabajos citados, la ley de control se diseña en el espacio de articulación. Por tanto, el objetivo de este trabajo consiste en diseñar una ley de control que incluya las dinámicas del robot manipulador y del motor de inducción para el seguimiento de trayectoria deseada en el espacio operacional o de trabajo.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección II se describe el modelo dinámico del robot manipulador y las propiedades del mismo. En la sección III se presenta el modelo dinámico y control del motor de inducción. En la sección IV se muestra el acoplamiento de las dinámicas del robot manipulador y del motor de inducción. En la sección V se diseña la ley de control basado en la metodología de Lyapunov. En la sección VI se exponen las pruebas y resultados de las simulaciones realizadas, las conclusiones son presentadas en la sección VII.

Metodología

Modelo del robot manipulador

Se considera un robot manipulador, completamente actuado, sin fricción, con $i = 1, \dots, n$ articulaciones. Los vectores de coordenadas de las articulaciones de los robots son $q_i \in \mathbb{R}^n$. Usando el formulismo de Euler-Lagrange, el modelo dinámico del robot es dado por:

$$M(q_i)\ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + g(q_i) = \tau_i, \quad (1)$$

Donde $M(q_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercias, $C(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas de Coriolis y fuerzas centrífugas, $g(q_i) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas debidas a la acción de la gravedad y $\tau_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares de entrada. Por simplicidad de notación, se evitará el uso de negrita para vectores y matrices.

Este modelo contempla las siguientes propiedades (Rodríguez-Ángeles y Nijmeijer, 2004):

- P1. La matriz de inercias $M_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es simétrica y definida positiva para todo $q_i \in \mathbb{R}^n$.
 P2. La matriz $[\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)]$ es antisimétrica, por lo que para toda $x \in \mathbb{R}^n$, $x^T [\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i, \dot{q}_i)] x = 0$.

Modelo y control del motor de inducción

El modelo dinámico del motor de inducción y su control no lineal fue tomado de (Marino et al. 2010), donde los vectores de corriente y flujo (i_a, i_b) , (λ_a, λ_b) del modelo (a.b) fijo al estator, son utilizados para expresar las ecuaciones del modelo en un esquema de campo orientado (d, q) .

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} &= \mu \lambda_d i_q - \frac{T_L}{J}, \\ \frac{d\lambda_d}{dt} &= -\alpha \lambda_d + \alpha L_m i_d, \\ \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + \alpha \beta \lambda_d + n_p \omega_m i_q \\ &\quad + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\lambda_d} + \frac{1}{\sigma L_s} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q - \beta n_p \omega_m \lambda_d - n_p \omega_m i_d \\ &\quad - \alpha L_m \frac{i_q i_d}{\lambda_d} + \frac{1}{\sigma L_s} u_q, \\ \frac{d\rho}{dt} &= n_p \omega_m + \alpha L_m \frac{i_q}{\lambda_d}, \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $\rho = \arctan \frac{\lambda_b}{\lambda_a}$, $\alpha = \frac{R_r}{L_r}$, $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$, $\mu = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m}{J L_r}$, $\gamma = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$, ω_m es la velocidad angular del rotor, i_d , i_q son las corrientes en el eje d y eje q ; λ_d los enlaces de flujo del rotor en el eje d . n_p , T_L son número de pares de polos y par de carga, respectivamente. J es el momento de inercia del motor, definido constante. L_m , L_s y L_r inductancia mutua y auto-inductancia del estator y rotor, obtenidas de $L_{(m,s,r)} = \frac{X_{(m,s,r)}}{2\pi f}$, en la cual $X_{(m,s,r)}$ es la reactancia inductiva mutua, del estator o rotor, según corresponda; f es la frecuencia nominal en Hertz (Hz). R_s y R_r resistencia del estator y rotor. u_d y u_q son las entradas de control no lineal de realimentación de estados, descritas por:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \sigma L_s \begin{pmatrix} -n_p \omega_m i_q - \alpha L_m \frac{i_q^2}{\lambda_d} - \alpha \beta \lambda_d + v_d \\ n_p \beta \omega_m \lambda_d + n_p \omega_m i_d + \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\lambda_d} + v_q \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Aplicando (3) al modelo, se obtiene el siguiente sistema de lazo cerrado:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} &= \mu \lambda_d i_q - \frac{T_L}{J}, \\ \frac{d\lambda_d}{dt} &= -\alpha \lambda_d + \alpha L_m i_d, \\ \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + v_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q + v_q, \\ \frac{d\rho}{dt} &= n_p \omega_r + \alpha L_m \frac{i_q}{\lambda_d}, \end{aligned} \quad (4)$$

Donde v_d y v_q son las nuevas entradas de control obtenidas al aplicar lazos PI:

$$v_d = K_{d1}(\lambda_{dref} - \lambda_d) + K_{d2} \int (\lambda_{dref} - \lambda_d) dt, \quad (5)$$

$$v_q = K_{q1}(T_{ref} - T_{em}) + K_{q2} \int (T_{ref} - T_{em}) dt, \quad (6)$$

$$T_{ref} = K_{q3}(\omega_{ref} - \omega_m) + K_{q4} \int (\omega_{ref} - \omega_m) dt, \quad (7)$$

Donde λ_{dref} , T_{ref} , ω_{ref} , son los enlaces de flujo del rotor, par y velocidad angular de referencia, respectivamente. K_{d1} , K_{d2} , K_{q1} , K_{q2} , K_{q3} , K_{q4} son ganancias constantes positivas. T_{em} es el par electromagnético, definido como $T_{em} = \mu J \lambda_d \dot{i}_q$.

Acoplamiento del robot manipulador-motor de inducción

Se considera que la i -ésima $i = 1, 2, \dots, n$, articulación del robot manipulador está siendo actuada directamente por un motor de inducción. Además se asume que la amplitud de los enlaces de flujo $\lambda_{d,i}$ es regulada al valor de la referencia constante $\lambda_{dref,i}$ a través del lazo de control (5), por lo cual el sistema de lazo cerrado para cada MI (4) se reduce a:

$$\begin{aligned} J_i \frac{d\omega_{m,i}}{dt} &= \mu_i J_i \lambda_{dref,i} \dot{i}_{q,i} - T_{L,i}, \\ \frac{di_{d,i}}{dt} &= -\gamma_i i_{d,i} + v_{d,i}, \\ \frac{di_{q,i}}{dt} &= -\gamma_i i_{q,i} + v_{q,i}, \end{aligned} \quad (8)$$

Sea $v_i = [v_{d,i} \ v_{q,i}]^T$, $I_i = [i_{d,i} \ i_{q,i}]^T$, $J_i = \text{diag}[J_1, J_2, \dots, J_n]$, $\Omega_i = [\omega_{m,1}, \omega_{m,2}, \dots, \omega_{m,n}]^T$, $B_i = \text{diag}[\mu_{i1} J_{i1}, \mu_{i2} J_{i2}, \dots, \mu_{in} J_{in}]$, $\Lambda_i = [\lambda_{dref,1} i_{q,1}, \lambda_{dref,2} i_{q,2}, \dots, \lambda_{dref,n} i_{q,n}]$. Donde $\Omega_i, T_{L,i}, \Lambda_i \in \mathbb{R}^n$; $J_i, B_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

El modelo reducido en lazo cerrado que representa los $i = 1, 2, \dots, n$ MI para el robot manipulador, se muestra como:

$$\begin{aligned} J_i \dot{\Omega}_i &= B_i \Lambda_i - T_{L,i}, \\ \dot{I}_i &= -\gamma_i I_i + v_i, \end{aligned} \quad (9)$$

Donde $\dot{\Omega}_i = \frac{d\Omega_i}{dt} \in \mathbb{R}^n$. Así mismo el vector de posición angular $\theta_i \in \mathbb{R}^n$ de los $i = 1, 2, \dots, n$ MI para el robot manipulador, es definido como $\theta_i = [\theta_{m,1}, \theta_{m,2}, \dots, \theta_{m,n}]^T$.

Suposición 1. Existe un acoplamiento mecánico directo entre el MI y la articulación del robot manipulador, por tanto:

$$\begin{aligned} q_i &= \theta_i, \\ \dot{q}_i &= \dot{\Omega}_i, \\ \ddot{q}_i &= \ddot{\Omega}_i. \end{aligned} \quad (10)$$

Suposición 2. El par de entrada o par requerido para cada articulación del robot manipulador, se considera como el par de carga aplicado a cada motor de inducción

$$T_{L,i} = \tau_i = M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + g_i(q_i). \quad (11)$$

Sustituyendo (11) y (10) en (9), se tiene que:

$$\begin{aligned} J_i \dot{\Omega}_i &= B_i \Lambda_i - [M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + g_i(q_i)], \\ B_i \Lambda_i &= J_i \ddot{q}_i + [M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + g_i(q_i)], \\ B_i \Lambda_i &= (J_i + M_i) \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + g_i(q_i), \\ D_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + g_i(q_i) &= B_i \Lambda_i, \end{aligned} \quad (12)$$

donde $D_i = J_i + M_i$.

Este sistema acoplado MI-Robot (12) tiene las mismas propiedades enunciadas en la sección II, debido a que $\dot{D}_i = \dot{J}_i + \dot{M}_i = \dot{M}_i$, J_i es constante.

Diseño de la ley de control de seguimiento de trayectoria en el espacio operacional

La posición y orientación del efector final en el espacio de trabajo, denotado por $x(t) \in \mathbb{R}^m$, es definido como (Behal et al. 2010):

$$x = f(q), \quad (13)$$

Donde $f(q) \in \mathbb{R}^m$ denota la cinemática directa y $q(t) \in \mathbb{R}^n$ denota la posición del eslabón. Las relaciones diferenciales entre las variables de la posición del efector final y la posición del eslabón puede ser calculada como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J(q)\dot{q}, \\ \ddot{x} &= \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q}, \end{aligned} \quad (14)$$

Donde $\dot{q}(t)$, $\ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ representan los vectores de velocidad y aceleración del eslabón, respectivamente.

El Jacobiano del manipulador, denotado por $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$, es definido como:

$$J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}. \quad (15)$$

La pseudo inversa de $J(q)$, descrita por $J^+(q) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, es definida como:

$$J^+ = J^T (J J^T)^{-1}. \quad (16)$$

El error de posición en el espacio de trabajo $e(t) \in \mathbb{R}^m$, es definido como:

$$e = x_d - x. \quad (17)$$

Donde $x_d \in \mathbb{R}^m$ representa la trayectoria deseada en el espacio de trabajo, los términos de trayectoria deseada $x_d(t)$, $\dot{x}_d(t)$ y $\ddot{x}_d(t)$ se asumen como funciones de tiempo acotadas. Por su parte, se describe un error que permitirá realizar la tarea en particular de seguimiento a una trayectoria deseada.

Este error se denota por $e_N(t) \in \mathbb{R}^n$, es definido como:

$$e_N = (I_n - J^+ J)(\vartheta - \dot{q}), \quad (18)$$

Donde $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz identidad $n \times n$ y $\vartheta(t) \in \mathbb{R}^n$ es una señal construida de acuerdo al objetivo de control requerido, así $\vartheta(t)$ y $\dot{\vartheta}(t)$ son señales acotadas.

Tomando la derivada de (17) y sustituyendo (14), se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}_d - \dot{x} = \dot{x}_d - J(q)\dot{q} + \alpha e - \alpha e \\ &= -\alpha e + J(J^+(\dot{x}_d + \alpha e) \\ &\quad + (I_n - J^+ J)\vartheta - \dot{q}), \end{aligned} \quad (19)$$

Donde el término αe ha sido sumado y sustraído para facilitar la formulación del control, $\alpha \in \mathbb{R}^{m \times m}$ denota una matriz diagonal de ganancias, definida positiva.

Basado en la estructura de (19), el error filtrado de seguimiento para reducir el orden del sistema dinámico, expresado por $r(t) \in \mathbb{R}^n$, es definido como:

$$r = J^+(\dot{x}_d + \alpha e) + (I_n - J^+ J)\vartheta - \dot{q}. \quad (20)$$

Así, el error de posición del sistema MI-Robot en el espacio de trabajo, puede ser escrito usando $r(t) \in \mathbb{R}^n$ como:

$$\dot{e} = -\alpha e + J r. \quad (21)$$

Si se toma la derivada respecto al tiempo de (21), pre-multiplicando por la matriz de inercias $D(q)$ del sistema acoplado MI-Robot (12) y sustituyendo la dinámica del manipulador, se mantiene dicha dinámica en lazo abierto:

$$D(q)\dot{r} = -C(q, \dot{q})r + Y\phi - B_i\Lambda_i, \quad (22)$$

Donde la formulación de la matriz de regresión/vector de parámetros $Y\phi$ es definida por:

$$Y\phi = D(q) \frac{d}{dt} \{J^+(\dot{x}_d + \alpha e) + (I_n - J^+ J)\vartheta\} + C(q, \dot{q})\{J^+(\dot{x}_d + \alpha e) + (I_n - J^+ J)\vartheta\} + g(q), \quad (23)$$

Donde $Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, x, q, \dot{q}, g, \dot{g}) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ es la matriz de regresión y $\phi \in \mathbb{R}^r$ denota los parámetros constantes del sistema (por ejemplo: masa, inercia, coeficientes de fricción, etc.).

A. Diseño del control basado en Lyapunov

Basado en el desarrollo de los errores del sistema, mostrado anteriormente, la entrada de control es diseñada a través del método de Lyapunov.

Teorema. Los errores de seguimiento de trayectoria $r(t) \in \mathbb{R}^n$ y $e(t) \in \mathbb{R}^m$ del sistema acoplado MI-Robot (12) son global y asintóticamente estables si la ganancia de la ley de control (27) K , es definida positiva.

Demostración. Se propone la función de Lyapunov:

$$V(r, e) = \sum_{i=1}^p \left\{ \frac{1}{2} r^T D r + \frac{1}{2} e^T e \right\}. \quad (24)$$

La matriz $V(r, e)$ es definida positiva para todo r, e y $V(r, e) = 0$ si y solo si $r = 0, e = 0$.

La derivada de $V(r, e)$ es:

$$\dot{V}(r, e) = r^T D \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{D} r + e^T \dot{e}.$$

Por propiedad de escalares $e^T J r = r^T J^T e$. Además, sustituyendo (22) $D \dot{r} = -C r + Y\phi - B_i\Lambda_i$ y (21) $\dot{e} = -\alpha e + J r$ en $\dot{V}(r, e)$:

$$\begin{aligned} \dot{V}(r, e) &= r^T (-C r + Y\phi - B_i\Lambda_i) \\ &+ \frac{1}{2} r^T \dot{D} r + e^T (-\alpha e + J r) \\ &= r^T \left(\frac{1}{2} \dot{D} - C \right) r - e^T \alpha e \\ &+ r^T (Y\phi - B_i\Lambda_i + J^T e). \end{aligned}$$

Por la propiedad de antisimetría de la matriz $(\dot{D} - 2C)$, se obtiene que:

$$\begin{aligned} \dot{V}(r, e) &= -e^T \alpha e \\ &+ r^T (Y\phi - B_i\Lambda_i + J^T e). \end{aligned} \quad (25)$$

Para forzar que $\dot{V}(r, e) < 0$ se establece la igualdad:

$$Y\phi - B_i\Lambda_i + J^T e = -K r, \quad (26)$$

Donde $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz de ganancias constante, definida positiva. Sustitución de (26) en (25) $\dot{V}(r, e)$:

$$\dot{V}(r, e) = -(e^T \alpha e + r^T K r) < 0.$$

De acuerdo a (Behal, 2010), se dice que los errores $e(t)$, $r(t)$ son global asintóticamente estables.

Por tanto, de (26) se desarrolla la ley de control que llevará a seguimiento de trayectoria deseada al sistema acoplado MI-Robot en el espacio operacional o de trabajo, como:

$$B_i\Lambda_i = Y\phi + K r + J^T e. \quad (27)$$

Pruebas y resultados

Para probar el enfoque de seguimiento de trayectoria (27), se utilizó la plataforma de Simulink® del software Matlab®, con la codificación de S-Function level-2.

Los parámetros de los robots manipuladores se tomaron de las hojas de datos del modelo BOSH® SR-8. Es un robot manipulador tipo SCARA con $i = 4$ articulaciones. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1. En la Tabla 2 se aprecian los datos del fabricante de los motores de inducción.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
l_1	0.43 m	m_1	15 kg	I_1	0.2313 kg · m ²
l_2	0.37 m	m_2	12 kg	I_2	0.13704 kg · m ²
l_{c1}	0.215 m	m_3	3 kg	$I_3 = I_4$	0.10074 kg · m ²
l_{c2}	0.185 m	m_4	3 kg	g	9.81 $\frac{m}{s^2}$

Tabla 1. Parámetros del robot SCARA, BOSH®-SR8.

Los MI tuvieron la misma referencia de los enlaces de flujo $\lambda_{ref} = 0.4 Wb$, tomada de (Ibrahim, 2015).

Las ganancias se establecieron como: $K_{d1} = diag[2000]$, $K_{d2} = diag[8000]$, $K_{q3} = diag[150]$, $K_{q4} = diag[150]$, $K = diag[30]$, $\alpha = diag[200]$.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Potencia	200 W	Polos	4
Velocidad	1732 rpm	Voltaje	220V-3 Fases
R_s	1.77 Ω	R_r	1.34 Ω
L_{ls}	0.024 H	L_m	0.245 H
L_{lr}	0.013 H	J	0.025 kg · m ²

Tabla 2. Parámetros del Motor de Inducción.

El esquema de simulación es presentado en la Figura 1.

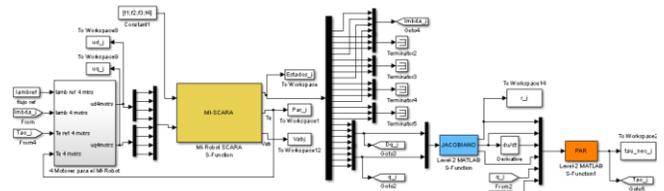


Figura 1. Esquema de simulación del seguimiento de trayectoria del MI-Robot en el espacio operacional.

La trayectoria deseada en el espacio operacional o de trabajo es descrita por la expresión:

$$x_d(t) = \begin{bmatrix} 0.55 + 0.1\text{sen}(2t) \\ 0.3 + 0.1\text{cos}(2t) \\ 0.08t \end{bmatrix} m. \tag{28}$$

La posición inicial en el espacio operacional del sistema acoplado MI-Robot es puesta a:

$$x_i(0) = \begin{bmatrix} 0.37 \\ 0.43 \\ 0 \end{bmatrix} m. \tag{29}$$

En la Figura 2 se muestra la vista en el plano $x - y$ del seguimiento de trayectoria en el espacio operacional del MI-Robot.

En la Figura 3 se aprecia la vista en el plano $x - z$. En línea de color negro se describe la trayectoria deseada. La línea de color azul se utiliza para la trayectoria del MI-Robot.

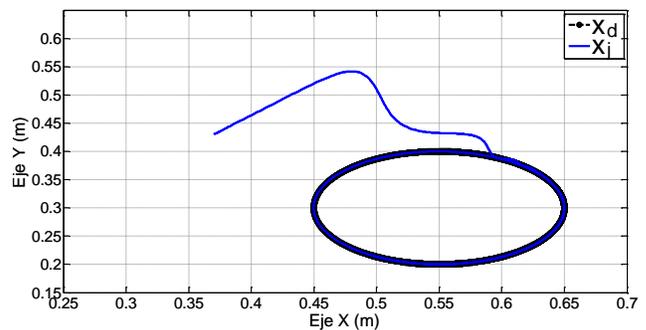


Figura 2. Seguimiento de trayectoria en el espacio operacional del MI-Robot. Plano x-y.

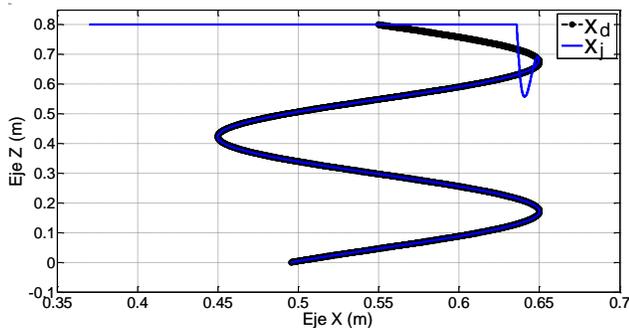


Figura 3. Seguimiento de trayectoria en el espacio operacional del MI-Robot. Plano x-z

El error de seguimiento de trayectoria se muestra en la Figura 4. Con línea punteada de color rojo se describe el error en la coordenada x .

En color magenta, se representa el error en la coordenada y .

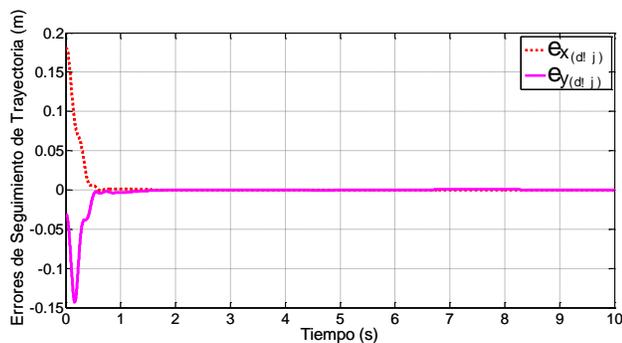


Figura 4. Error del seguimiento de trayectoria en el espacio operacional del MI-Robot. En las coordenadas x , y .

Conclusiones

Se ha diseñado la ley de control para seguimiento de trayectoria en el espacio operacional o de trabajo, a diferencia del espacio de articulación como en los trabajos anteriores, de un robot manipulador actuado completamente por motores de inducción trifásicos.

La ley de control en base a la metodología de Lyapunov, se probó en simulación a través de la dinámica de un robot SCARA de 4 grados de libertad.

Los resultados mostraron que el controlador logra el objetivo de seguir la trayectoria deseada en el espacio operacional o de trabajo en un tiempo finito, manteniendo una convergencia global y asintótica de los errores de seguimiento de trayectoria en su respuesta en lazo cerrado.

Referencias

Behal et al. 2010] A. Behal, W. Dixon, D. Dowson y B. Xian, "Lyapunov-Based Control of Robotic Systems", CRC Press. 2010.

Diniz et al. 2012. E. Diniz, A. Júnior, D. Honório y otros, "An elbow planar manipulator driven by induction motors using sliding mode control for current loop". Control and Cybernetics, vol. 41, No. 2, pp. 395-413, 2012.

Guerrero y Tang, 2001. G. Guerrero y Y. Tang, "Motion control of rigid robots driven by current-fed induction motors". Mechatronics, vol. 11, pp. 13-25, 2001.

Hsu y Fu, 2005] S. Hsu y L. Fu, "Adaptive decentralized control of robot manipulators driven by current-fed induction motors". Mechatronics, IEEE/ASME Transactions, vol.10, no.4, pp. 465-468, 2005.

Hu et al. 1996. J. Hu, D.M. Dawson, Y. Qian, "Position tracking control for robot manipulators driven by induction motors without flux measurements". Robotics and Automation, IEEE Transactions, vol.12, no.3, pp. 419-438, 1996.

Ibrahim, 2015. S. Ibrahim, N. Faris, E. Elzahab, "Implementation of fuzzy modeling system for faults detection and diagnosis in three phase induction motor drive system". Journal of Electrical Systems and Information Technology, vol. 2, No. 1, pp. 27-46, 2015.

Marino et al. 2010. R. Marino, S. Peresada y P. Valigi. "Induction motor control design". Springer Science & Business Media. 2010.

Rodriguez-Angeles y Nijmeijer, 2004. A. Rodriguez-Angeles y H. Nijmeijer (2004), "Mutual Synchronization of Robots via Estimated State Feedback: A Cooperative Approach", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 12, No. 4, pp. 542 – 554, 2004.

Seleme, 1999. I. Seleme, "Robot Motion Control with Induction Motors". Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control, Phoenix, Arizona USA, December 1999, pp. 347-352.