

Trajectory Kinematics Control for a Robotis Bioloid Premium Arm

R. Castañeda-González, E. Archila-Sánchez,
L. García-Domínguez, J. Cervantes-Morales,
J. Santiaguillo-Salinas

*Departamento. de Ing. en Mecatrónica, Universidad del Papaloapan
Av. Ferrocarril S/N, 68400, Loma Bonita, Oaxaca, México
(e-mail: phoenix.robert.2358@gmail.com,
archila.sanchez.eliuhgabriel@gmail.com, luisfelipegd2@gmail.com,
diegocervantes017@gmail.com, jsantiaguillo@outlook.com)*

Abstract: This paper addresses the problem of trajectory tracking in one arm of the Bioloid Premium humanoid robot. The kinematics modeling of the left arm was obtained using the Denavit-Hartenberg methodology. A kinematics control strategy based on state feedback and Input-Output Linearization technique was employed to achieve accurate tracking of the desired trajectories. A C language code was written to reprogram the CM-530 controller of the Bioloid Premium to allow it to interpret and execute the trajectory positions. In addition, wireless communication was established using ROS as the development platform. The experimental results demonstrate the success of the proposed approach in applying kinematic control on the robotic arm, offering an accurate and advanced alternative to the mobility options natively enabled by the ROBOTIS software.

Keywords: Input-Output Linearization, Trajectory tracking, Bioloid Premium, Humanoid Robot Arm, Direct Kinematics, Kinematic Control, State Feedback.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica humanoide es una disciplina que busca crear robots que imiten la apariencia y el movimiento de los seres humanos. El desarrollo de la robótica humanoide ha experimentado un auge significativo desde el lanzamiento del Honda P2, que fue uno de los primeros robots humanoides que capturó la atención del público y demostró el potencial de esta tecnología Hirai (1997), Hirai et al. (1998). El éxito del Honda P2 y su sucesor, el Honda P3, impulsó a otras empresas y universidades a embarcarse en proyectos de robótica humanoide Kajita et al. (2014).

La robótica humanoide ha encontrado aplicaciones en áreas como la salud Salamea et al. (2019), el ámbito militar Joshi et al. (2017), exploración y reconocimiento Contreras and la Rosa (2016). Las aplicaciones antes mencionadas comprenden desde el mejoramiento de la movilidad, estabilidad y destreza de los robots humanoides hasta su implementación en entornos industriales. Otra de las aplicaciones comunes de la robótica es el seguimiento y/o planificación de trayectorias, rama que ha sido estudiada ampliamente en robots móviles en sus distintos tipos Torres and Méndez (2009), Thai (2017), así como en robots manipuladores implementando distintas estrategias de control Salamea et al. (2019).

El Bioloid Premium, de ROBOTIS, es un kit de robótica que permite la construcción y programación de un robot humanoide con 18 grados de libertad que hace uso de motores Dynamixel en su modelo AX-12A para el movimiento de sus extremidades Guerrero-Castellanos et al. (2014), Serrano et al. (2014). Se ha observado que, el funcionamiento de este humanoide se encuentra limitado a la definición e interpolación de posiciones que posteriormente se condicionan en un entorno de programación que, aunque básico, no deja de ser útil para investigación y aplicaciones incluso médicas en la vida real Salamea et al. (2019).

Aunque el robot Bioloid Premium no se considera un manipulador en toda regla debido a su naturaleza humanoide, es posible analizar y abordar el seguimiento de trayectorias desde la perspectiva de su brazo como si fuera un manipulador independiente. En este sentido, se pueden aplicar conceptos y técnicas de planificación y control de movimiento para lograr que el brazo del Bioloid siga una trayectoria específica en el espacio.

En este artículo, se obtiene el *modelado cinemático* y se propone un enfoque para implementar control cinemático en un brazo del Robot Humanoide Bioloid Premium. La estrategia control se diseña mediante un *algoritmo* basado en la retroalimentación de estados, utilizando mediciones

de los encoders incorporados en los motores Dynamixel AX-12A, y la cinemática directa para obtener información sobre el estado actual del brazo robótico. Se aplica la técnica de *Input-Output Linearization* para cancelar parcialmente la dinámica del sistema y establecer una dinámica deseada. El objetivo es lograr un seguimiento preciso de las trayectorias deseadas en el brazo robótico. Para ello, se implementa un sistema de comunicación con ROS (*Robotic Operating System*) y la placa ESP32 conectada por el puerto serie al controlador CM-530 del Bioloid Premium, estableciendo de esta forma la comunicación mediante sockets TCP. Esto permite superar las limitaciones del software preexistente del Bioloid y lograr un control más sofisticado, facilitando el seguimiento preciso de trayectorias específicas. Los resultados obtenidos son validados de manera numérica y experimental.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se muestra el modelado cinemático del brazo del robot Bioloid Premium, donde se obtienen la cinemática directa y diferencial. La Sección 3 presenta el planteamiento del problema. El diseño de la estrategia de control es presentada en la Sección 4. La Sección 5 contiene la parte experimental del trabajo, se muestra la plataforma experimental integrada y los resultados obtenidos de la implementación de la estrategia de control en dicha plataforma. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. MODELADO CINEMÁTICO

Es sumamente importante analizar y entender el modelo matemático que describe al sistema en estudio. En este contexto, se centra la atención en el modelado cinemático, que proporciona una descripción geométrica del movimiento del robot sin considerar las fuerzas involucradas.

2.1 Cinemática Directa

La cinemática directa de robots manipuladores se refiere al estudio analítico del movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares generalizadas, sus parámetros geométricos y las coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ y de orientación $[\theta, \phi, \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ del extremo final del robot, Cortés (2011).

Para encontrar las ecuaciones que describen la posición del brazo izquierdo del robot Bioloid Premium, se utiliza la metodología de Denavit-Hartenberg Cortés (2011).

Se asignan los marcos de referencia de cada una de las articulaciones, tal como se muestra en la Fig. 1. Posteriormente se localizan los parámetros Denavit-Hartenberg del robot con lo que se construye la Tabla 1.

Una vez calculados los parámetros de cada eslabón, se obtienen las matrices de transformación homogéneas H_i . Finalmente, se calcula la matriz de transformación T que

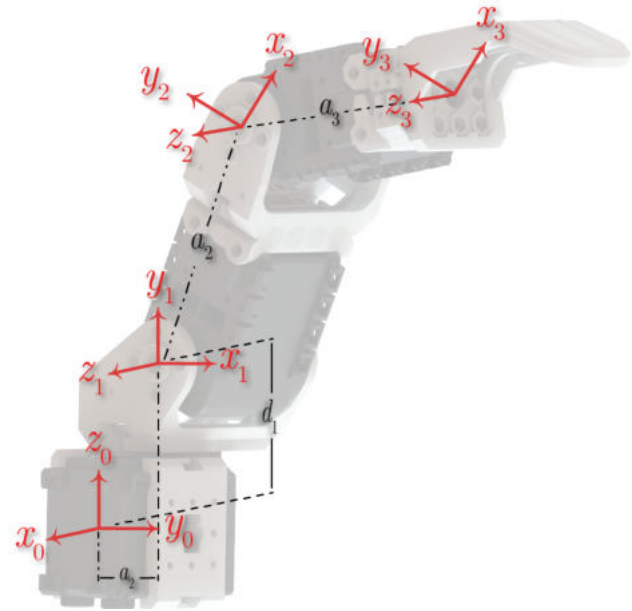


Fig. 1. Brazo del robot ROBOTIS Bioloid Premium

indica la localización del efector final con respecto al marco base del brazo del robot

$$T_0^3 = H_1 H_2 H_3 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{33} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ r_{21} &= \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ r_{31} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ r_{12} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 \\ r_{22} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 \\ r_{32} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ r_{13} &= \sin \theta_1 \\ r_{23} &= -\cos \theta_1 \\ r_{33} &= 0. \end{aligned}$$

La cinemática directa viene determinada por las ecuaciones de los elementos de la última columna y tres primeras filas (vector de traslación)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 c \theta_1 + a_2 c \theta_1 c \theta_2 + a_3 c(\theta_2 + \theta_3) c \theta_1 \\ a_1 s \theta_1 + a_2 c \theta_2 s \theta_1 + a_3 c(\theta_2 + \theta_3) s \theta_1 \\ d_1 + a_2 s \theta_2 + a_3 c \theta_2 s \theta_3 + a_3 c \theta_3 s \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

con $c \theta_i = \cos \theta_i$ y $s \theta_i = \sin \theta_i$.

Table 1. Parámetros Denavit-Hartenberg

Eslabón	a_i	α_i	θ_i	d_i
1	a_1	90°	θ_1	d_1
2	a_2	0	θ_2	0
3	a_3	0	θ_3	0

2.2 Cinemática Diferencial

Se encuentra el modelo cinemático diferencial derivando parcialmente las ecuaciones de la cinemática directa (2), con respecto a cada una de las variables articulares

$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial \theta_1} &= -[a_1 s \theta_1 + a_2 c \theta_2 s \theta_1 + a_3 c (\theta_2 + \theta_3) s \theta_1] \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} &= a_1 c \theta_1 + a_2 c \theta_1 c \theta_2 + a_3 c (\theta_2 + \theta_3) c \theta_1 \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} &= 0 \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_2} &= -[a_2 c \theta_1 s \theta_2 + a_3 c \theta_1 s (\theta_2 + \theta_3)] \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_2} &= -[a_2 s \theta_1 s \theta_2 + a_3 s \theta_1 s (\theta_2 + \theta_3)] \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_2} &= a_2 c \theta_2 + a_3 c (\theta_2 + \theta_3) \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_3} &= -[a_3 c \theta_1 s (\theta_2 + \theta_3)] \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_3} &= -[a_3 s \theta_1 s (\theta_2 + \theta_3)] \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_3} &= a_3 c (\theta_2 + \theta_3).\end{aligned}$$

Entonces, la cinemática del sistema se describe como sigue

$$\dot{\xi} = J(\theta) w = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} w, \quad (3)$$

donde $J(\theta)$ es el Jacobiano del sistema y w es el vector de velocidades articulares.

Para diseñar estrategias de control continuas e invariantes en el tiempo $\det |J(\theta)| \neq 0$. En este caso, el determinante del Jacobiano está dado por

$$-a_2 a_3 \sin(\theta_3) (a_1 + a_2 c(\theta_2) + a_3 c(\theta_2 + \theta_3)). \quad (4)$$

Por lo tanto, $\det |J(\theta)| \neq 0$ si y solo si $\theta_3 \neq 0$.

Nota 1. Cabe mencionar que se tiene un pseudo Jacobiano, es decir, el Jacobiano no es de orden completo; por lo que, solo se podrá controlar el extremo final del brazo en posición y no en orientación.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Sea $m(t) = [x^d(t), y^d(t), z^d(t)]^T$ una trayectoria preestablecida y continuamente diferenciable. Se desea diseñar una estrategia de control $w = f(t)$ basada en el modelo cinemático de un brazo del robot Bioloid Premium tal que

- Se logre el seguimiento asintótico de trayectorias (control de seguimiento)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\xi(t) - m(t)) = 0.$$

4. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

La estrategia de control empleada consiste en una retroalimentación de estados. Dicho control se diseña a partir del modelado cinemático, donde las salidas del sistema están relacionadas con las posiciones angulares de los motores en cada articulación del brazo robótico. Si bien se emplea la retroalimentación de estados como estrategia de control, también se aplica la técnica de *Input-Output Linearization* Siciliano et al. (2009). Esta técnica busca cancelar la dinámica del sistema para imponer una dinámica deseada.

Se propone un control auxiliar

$$r = \begin{bmatrix} -k_x (x - x^d) + \dot{x}^d \\ -k_y (y - y^d) + \dot{y}^d \\ -k_z (z - z^d) + \dot{z}^d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde $m(t) = [x^d(t), y^d(t), z^d(t)]^T$ es la trayectoria deseada, $\dot{m}(t) = [\dot{x}^d(t), \dot{y}^d(t), \dot{z}^d(t)]^T$ es la velocidad de la trayectoria y k_x, k_y, k_z las ganancias de control. Entonces el control resulta

$$w = J^{-1}(q) r, \quad (6)$$

con $J^{-1}(q)$ el Jacobiano inverso del sistema.

Proposición 1. Considere el sistema (3) y la estrategia de control (6). Suponga que $k_x, k_y, k_z > 0$. Entonces, en el sistema en lazo cerrado (3)-(6) el efector final del brazo del robot converge a la trayectoria deseada de manera local, i.e.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\xi(t) - m(t)) = 0.$$

Demostración. El error del sistema y su dinámica están determinadas por

$$e(t) = \begin{bmatrix} x^d(t) - x(t) \\ y^d(t) - y(t) \\ z^d(t) - z(t) \end{bmatrix}; \quad \dot{e}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}^d(t) - \dot{x}(t) \\ \dot{y}^d(t) - \dot{y}(t) \\ \dot{z}^d(t) - \dot{z}(t) \end{bmatrix}.$$

Sustituyendo el sistema en lazo cerrado (3)-(6) en la dinámica del error resulta

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \begin{bmatrix} \dot{x}^d - \dot{x} \\ \dot{y}^d - \dot{y} \\ \dot{z}^d - \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_x (x^d - x) \\ -k_y (y^d - y) \\ -k_z (z^d - z) \end{bmatrix} \\ \dot{e} &= \begin{bmatrix} -k_x & 0 & 0 \\ 0 & -k_y & 0 \\ 0 & 0 & -k_z \end{bmatrix} e.\end{aligned}$$

El sistema es autorregulado ya que no presenta alguna entrada, por lo cual es estable y convergerá a cero cuando los polos del sistema sean negativos. El polinomio característico del sistema es

$$P(s) = (s + k_x)(s + k_y)(s + k_z). \quad (7)$$

por lo que, para $k_x, k_y, k_z > 0$ el sistema será estable y convergerá a la trayectoria de forma local. ■

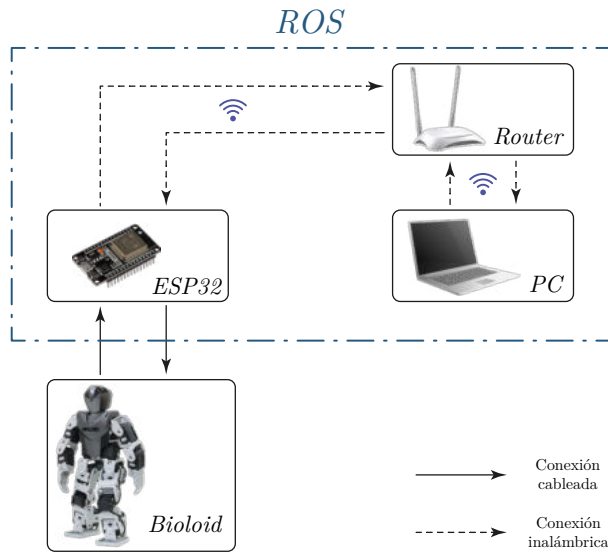


Fig. 2. Esquema de la plataforma experimental

5. EXPERIMENTACIÓN

5.1 Plataforma Experimental

Para validar los resultados teóricos de forma experimental se utilizó la plataforma mostrada en la Fig. 2. Se implementa una comunicación en ROS entre una computadora y la placa ESP32, conectada por el puerto serie al controlador CM-530 del Bioloid Premium.

ROS se utilizó para realizar el cálculo de la trayectoria y la implementación de la estrategia de control a partir de un nodo escrito en Python. La placa **ESP32** se programó utilizando el IDE de Arduino y en ella, se ejecuta un código que convierte los datos de posición resueltos y transmitidos por ROS, en un conjunto de bytes que se transmiten en un formato basado en el protocolo ZigBee Ramya et al. (2011), Baker (2005) por el puerto serie hacia el controlador **CM-530** del Bioloid Premium.

En relación al Firmware del Bioloid Premium, se identificó que su funcionalidad está limitada en términos de implementaciones avanzadas. El software proporcionado por la compañía ROBOTIS, basa su funcionamiento en grabar posiciones moviendo manualmente el humanoide y, posteriormente, definir las condiciones en que se ejecutarán en un entorno de programación básico.

Se desarrolló un código en lenguaje C, que se encarga de interpretar los datos de posición recibidos desde la ESP32 y generar los comandos necesarios para que los actuadores de interés ejecuten los movimientos. Este código se cargó en el CM-530 y permitió implementar el control cinemático, para posteriormente realizar seguimiento de trayectorias con el brazo del robot humanoide.

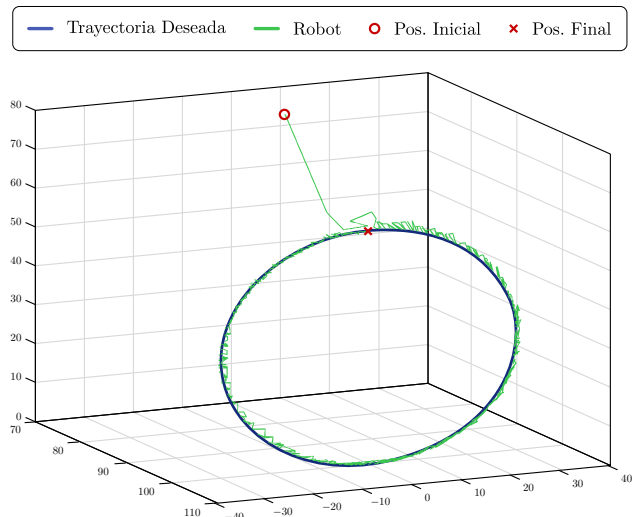


Fig. 3. Trayectoria del brazo del robot

5.2 Resultados Experimentales

La trayectoria deseada es una circunferencia dada por

$$m(t) = \left[0.1, a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + a \right]^T$$

con $a = 0.03\text{m}$ y un periodo $T = 60\text{s}$. Las ganancias de control son $k_x = 15$, $k_y = 20$ y $k_z = 25$. Dichas ganancias se ajustaron experimentalmente hasta obtener resultados con mayor exactitud.

La Fig. 3 muestra el movimiento realizado por el efector final del brazo del robot durante el experimento. Se aprecia como su trayectoria converge a la trayectoria deseada, aunque con pequeñas oscilaciones. La Fig. 4 muestra los errores de posición del brazo del robot. Se puede ver como los errores convergen a una vecindad cercana a cero. Es posible observar más a detalle las oscilaciones mencionadas anteriormente durante el seguimiento, estas se pueden atribuir a factores dinámicos no considerados como fricción, efectos de gravedad o limitaciones de desempeño de los actuadores. La Fig. 5 muestra las señales de control. Al inicio, las señales de control de las articulaciones 2 y 3 son grandes ya que intenta corregir el error presente. Por último, la Fig. 6 muestra el comportamiento de las variables articulares $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ al seguir la trayectoria.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el modelado y control para un brazo del robot humanoide comercial Bioloid Premium. Se utiliza un modelo cinemático para la representación matemática del brazo del robot. Se diseña una estrategia de control para el seguimiento de trayectorias, mediante retroalimentación de estados. Los resultados teóricos se validan numérica y experimentalmente. Siendo la integración de la plataforma experimental el principal aporte técnico del trabajo.

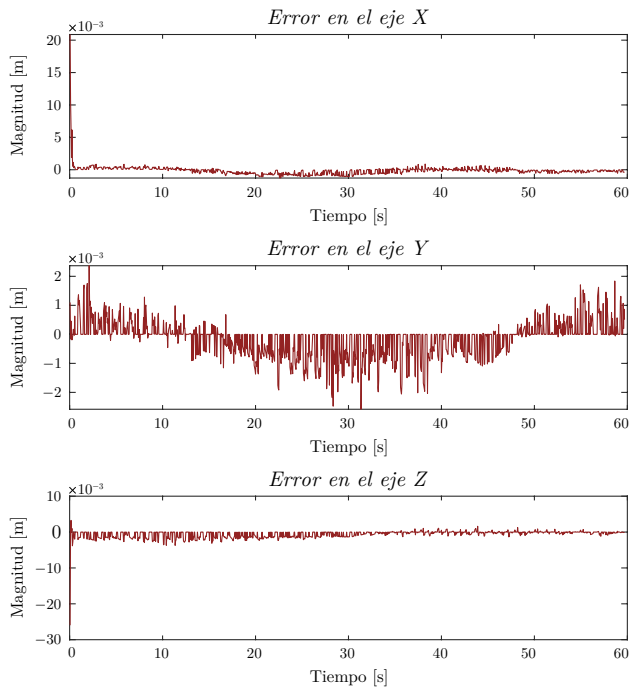


Fig. 4. Errores de posición del brazo del robot

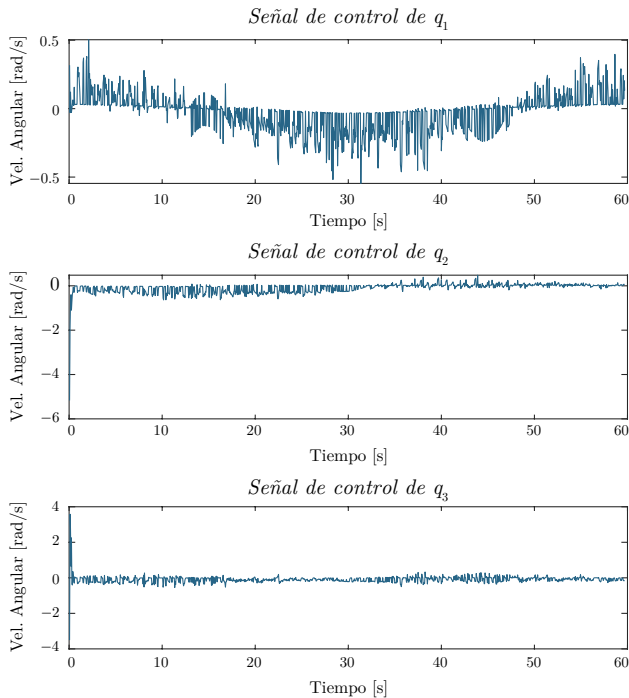


Fig. 5. Señales de control w

El enfoque de control cinemático ofrece una alternativa viable a los movimientos predefinidos para el Robot Humanoide Bioloid Premium, permitiendo a los usuarios programar y controlar los movimientos del brazo de manera más precisa y adaptable, mejorando sus funciones. El uso de la comunicación inalámbrica y el empleo de ROS

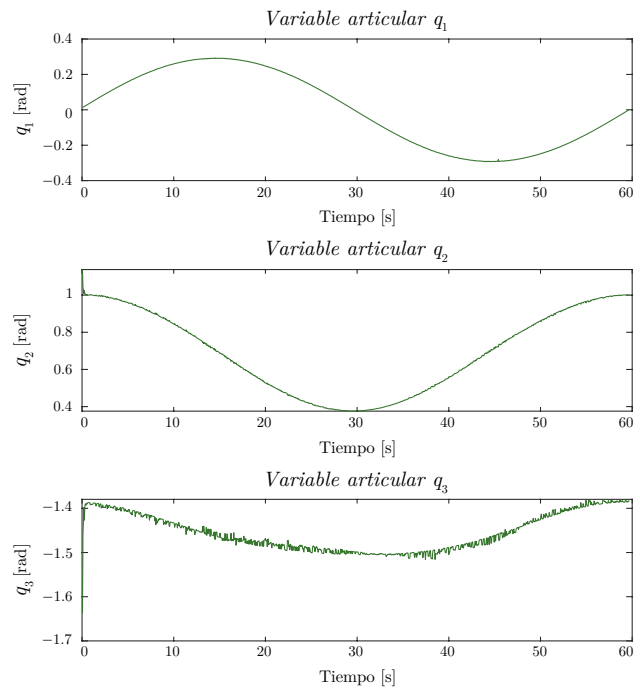


Fig. 6. Valor de las variables articulares

como plataforma de comunicación y control permiten una mayor flexibilidad y personalización en la implementación de la estrategia de control cinemático.

Es posible concluir que, a partir de los resultados experimentales obtenidos, el control cinemático de robots manipuladores es una alternativa viable hoy en día para el desarrollo de estrategias para el seguimiento de trayectorias y que además, la integración y puesta en marcha de la plataforma experimental presentada en este trabajo es una propuesta con potencial como plataforma de desarrollo para investigadores.

Como trabajo futuro se propone estudiar la dinámica del sistema para diseñar controladores que actúen de manera directa sobre las fuerzas o torques en el efector final del brazo del robot y de esta forma lidiar con los errores obtenidos por las dinámicas no modeladas. Esto permitirá una interacción sensible y adaptable a los cambios del entorno.

REFERENCES

- Baker, N. (2005). ZigBee and bluetooth: strengths and weaknesses for industrial applications. *Computing and Control Engineering*, 16(2), 20–25. doi: 10.1049/cce:20050204.
- Contreras, S. and la Rosa, F.D. (2016). Aplicación de deep learning en robótica móvil para exploración y reconocimiento de objetos basados en imágenes. *2016 IEEE 11th Colombian Computing Conference (CCC)*. doi:10.1109/columbiancc.2016.7750800.
- Cortés, F.R. (2011). *Róbotica: control de robots manipuladores*.

- Guerrero-Castellanos, J., Villarreal-Cervantes, M., Sánchez-Santana, J., and Ramírez-Martínez, S. (2014). Seguimiento de trayectorias de un robot móvil (3,0) mediante control acotado. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 11(4), 426–434. doi:10.1016/j.riai.2014.09.005.
- Hirai, K. (1997). Current and future perspective of honda humamoid robot. *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Innovative Robotics for Real-World Applications. IROS 97*. doi:10.1109/iro.1997.655059.
- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., and Takenaka, T. (1998). The development of honda humanoid robot. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. doi:10.1109/robot.1998.677288.
- Joshi, S.A., Aravalli, G., Vidyashree, A.K., Ranade, S., and Badami, S.S. (2017). Wireless controlled military combat robot system. *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES)*. doi:10.1109/cesys.2017.8321173.
- Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K., and Yokoi, K. (2014). *Introduction*, chapter 1, 1–17. Springer Berlin Heidelberg.
- Ramya, C.M., Shanmugaraj, M., and Prabakaran, R. (2011). Study on ZigBee technology. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. doi:10.1109/icectech.2011.5942102.
- Salamea, H.M.T., Cedillo, P.A.S., Alvarado-Cando, O., and Auquilla, A.R. (2019). Health care in the older adult by means of a bioloid robot as a social assistive to motivate physical exercise. *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*. doi:10.1109/iestec46403.2019.00097.
- Serrano, M.E., Scaglia, G.J.E., Romoli, S., Ortiz, O.A., and Mut, V. (2014). Seguimiento de trayectoria considerando incertidumbres aditivas en robots móviles. *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*. doi:10.1109/argencon.2014.6868475.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2009). *Robotics*. Springer London. doi:10.1007/978-1-84628-642-1.
- Thai, C.N. (2017). *Exploring Robotics with ROBOTIS Systems*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-59831-4.
- Torres, S. and Méndez, J. (2009). Seguimiento de trayectorias en robots manipuladores: Revisión de soluciones y nuevas propuestas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(4), 80–92. doi:10.1016/s1697-7912(09)70111-6.