




Seguimiento de trayectorias para un robot manipulador antropomórfico mediante APF's

Trajectory tracking for an anthropomorphic manipulator robot using APF's

Z. Flores-Murcia ^a, D. Y. Lara-Solís ^a, J. Santiaguillo-Salinas ^{a,*}, E. Aranda-Bricaire ^b

^aDepartamento de Ing. Mecatrónica, Universidad del Papaloapan, 68400, Loma Bonita, Oaxaca, México.

^bDepartamento de Ing. Eléctrica, Sección Mecatrónica, CINVESTAV-IPN, 07000, Ciudad de México, México.

Resumen

En este artículo se presenta un algoritmo de control aplicando la teoría de los campos potenciales atractivos (APF's por sus siglas en inglés) para lograr el seguimiento de trayectorias en un robot manipulador antropomórfico de tres grados de libertad. Se propone un APF junto a su gradiente descendiente para la resolución del problema. Los resultados teóricos se validan numéricamente en Matlab/Simulink utilizando diferentes trayectorias para corroborar la estabilidad del algoritmo.

Palabras Clave: Campos Potenciales Atractivos, Gradiente Descendiente, Seguimiento de Trayectorias, Robot Manipulador Antropomórfico, Matlab/Simulink.

Abstract

This paper presents a control algorithm applying the theory of attractive potential fields (APF's) to achieve trajectory tracking in an anthropomorphic manipulator robot with three degrees of freedom. An APF together with its gradient descent is proposed to solve the problem. The theoretical results are validated numerically in Matlab/Simulink using different trajectories to corroborate the stability of the algorithm.

Keywords: Attractive Potential Fields, Gradient Descent, Trajectory Tracking, Anthropomorphic Robot Manipulator, Matlab/Simulink.

1. Introducción

En pocos años los robots se han posicionado en casi todas las áreas productivas, sustituyendo al hombre en aquellas tareas repetitivas y peligrosas (Colorado, 2016). Los robots manipuladores se han convertido en una parte esencial de la automatización industrial moderna; su implementación contribuye a líneas de montaje aceptables y automatizadas en todo tipo de industrias. Sin embargo, su uso va mucho más allá del sector manufacturero. El desarrollo continuo de robots manipuladores sofisticados gana terreno debido a su precisión y eficiencia. Por lo que, la generación de trayectorias es una cuestión esencial en la aplicación de dichos robots.

El estudio de la cinemática de robots manipuladores es indispensable para la formulación de estrategias de control. La cinemática directa es el problema geométrico de calcular la posición y orientación del efector final del manipulador, y la cine-

mática inversa es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas (Craig, 2006), (Cortes, 2020). Una buena estrategia de control determinará la precisión y eficiencia para realizar trayectorias, es por esta razón que se han investigado diferentes propuestas para la obtención de la cinemática y para estrategias de control aplicadas a robots manipuladores (Vergara-Hernandez *et al.*, 2023), (Ramírez-López y Martínez-Aragón, 2022), (Shahzad *et al.*, 2020), (Lechuca-Gutiérrez y Domínguez-Ramírez, 2022).

El objetivo de un seguimiento de trayectoria es la realización de un movimiento suave del manipulador desde la configuración inicial a la final. Pero el problema del seguimiento de trayectorias es uno de los más difíciles de la informática debido al cálculo numérico (Spong *et al.*, 2020). En estos últimos años, se ha empezado a utilizar una técnica de seguimiento basado

*Autor para correspondencia: jsantiaguillo@outlook.com

Correo electrónico: zuri3aelec@gmail.com (Zurisadai Flores-Murcia), darethls01@gmail.com (Daly Yareth Lara-Solís), jsantiaguillo@outlook.com (Jesús Santiaguillo-Salinas), earanda@cinvestav.mx (Eduardo Aranda-Bricaire).

Historial del manuscrito: recibido el 15/12/2023, última versión-revisada recibida el 09/03/2024, aceptado el 11/03/2024, publicado el 22/04/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial2.12270>



en campos potenciales artificiales que destaca por su elegancia y simplicidad (Jia y Wang, 2010). Los campos potenciales fueron propuestos por Oussama Khatib en 1986, la idea de su utilización es poder crear un campo escalar que contiene “colinas”(representan los puntos repulsivos) y “valles”(representan los puntos atractivos), así se puede definir que el manipulador se mueve en el campo de fuerzas, la posición a alcanzar es un polo de atracción para el efector final y los obstáculos son superficies repulsivas para las partes del manipulador (Khatib, 1986). Esta técnica se ha propuesto como estrategia de control principalmente para: planeación de trayectorias con la finalidad de evitar obstáculos (Chen *et al.*, 2019); el control de formación colineal de robots autónomos (Dang y Horn, 2015); simulaciones del flujo de tráfico marítimo (Cheng *et al.*, 2017); prevención de colisión en grupos de agentes (Gonzalez-Sierra *et al.*, 2016). Esta técnica ha sido tan interesante que ya se ha empezado aplicar no solo en robots móviles, sino también a manipuladores (Guan *et al.*, 2015), (Yang *et al.*, 2017), (Badawy, 2014), (Chen *et al.*, 2019).

En este trabajo se presenta el diseño y validación numérica de una estrategia de control para el seguimiento de trayectorias basada en APF's para un robot manipulador antropomórfico de 3 grados de libertad, con la finalidad de hacer converger el efector final del manipulador a una posición deseada haciendo uso de una trayectoria en el espacio. El objetivo principal de los APF's en este trabajo es utilizar la simplificación de técnicas y recursos computacionales que ofrecen los APF's, en comparación de otras técnicas de control diseñadas a partir de la cinemática del robot. Para realizar el seguimiento de trayectorias se utiliza la cinemática inversa para poder trabajar en el espacio articular del manipulador y crear un algoritmo basado en campos potenciales implementado en MATLAB/Simulink.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta el modelo cinemático del robot. La Sección 3 describe el planteamiento del problema. En la Sección 4 se realiza el diseño del control utilizando los campos potenciales atractivos. La Sección 5 presenta los resultados obtenidos de la validación numérica realizada en Matlab/Simulink. Por último, en la Sección 6 se presentan algunas conclusiones y trabajo futuro.

2. Modelo cinemático

El modelo cinemático de un robot manipulador estudia el movimiento del robot respecto a un sistema de referencia fijo (Andueza y Aguirre, 2008). El modelo cinemático implica la obtención de la cinemática directa y la cinemática inversa.

2.1. Cinemática directa

Eslabón	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90°	a_1	d_1	θ_1
2	180°	a_2	0	θ_2
3	0	a_3	0	$\theta_3 - 90^\circ$

La cinemática directa determina la posición y orientación del extremo del robot con ayuda de sus parámetros (Craig,

2006). Para la obtención de la cinemática directa se emplea el algoritmo Denavit-Hartenberg (D-H) (Spong *et al.*, 2020). Se asignan marcos de referencia para cada eslabón, como se muestra en la Figura 1. Se crea la tabla de parámetros D-H mostrada en la Tabla 1 y se obtienen las matrices de transformación homogéneas.

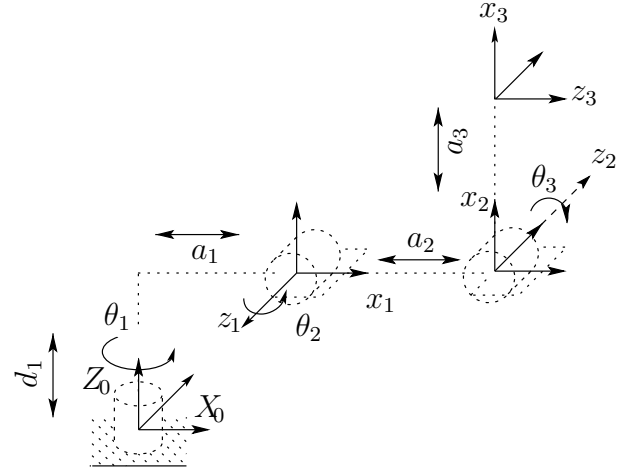


Figura 1: Esquema del robot con sus marcos coordenados.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & a_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & a_1 S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & S\theta_2 & 0 & a_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & -C\theta_2 & 0 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3 S\theta_3 \\ -C\theta_3 & S\theta_3 & 0 & -a_3 C\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

La cinemática directa resulta

$$T_3^0 = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde

$$R_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} C\theta_1 S(\theta_3 - \theta_2) & C\theta_1 C(\theta_2 - \theta_3) & -S\theta_1 \\ S\theta_1 S(\theta_3 - \theta_2) & S\theta_1 C(\theta_2 - \theta_3) & C\theta_1 \\ C(\theta_2 - \theta_3) & S(\theta_2 - \theta_3) & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

y

$$P_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} C\theta_1 [a_3 S(\theta_3 - \theta_2) + a_2 C\theta_2 + a_1] \\ S\theta_1 [a_3 S(\theta_3 - \theta_2) + a_2 C\theta_2 + a_1] \\ a_3 C(\theta_2 - \theta_3) + a_2 S\theta_2 + d_1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

La posición del efector final con respecto al marco de referencia fijo está dado por $P = [x, y, z]^T$

2.2. Cinemática inversa

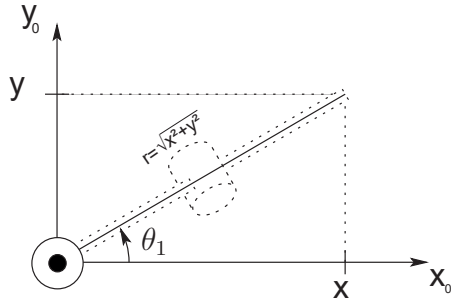


Figura 2: Vista superior del robot. Obtención de θ_1 .

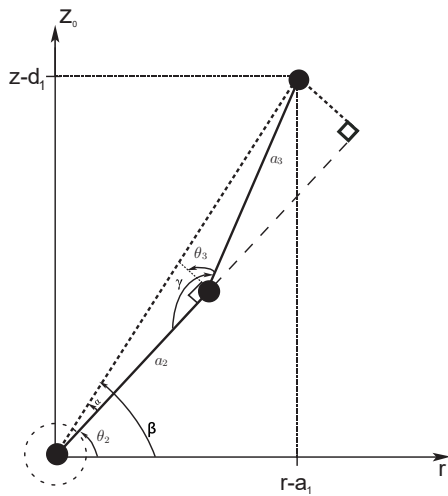


Figura 3: Vista lateral del robot. Obtención de θ_2 y θ_3 .

La cinemática inversa determina la posición angular de cada articulación a partir de las coordenadas cartesianas del extremo del robot y se calcula de forma gráfica (Fernández y Marrero-Osorio, 2017). De acuerdo a la Figura 2 se obtiene

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right). \quad (7)$$

A partir de la Figura 3 se obtienen

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{z-d_1}{r-a_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a_3 \cos(\theta_3)}{a_2 + a_3 \sin(\theta_3)}\right), \quad (8)$$

y

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{(z-d_1)^2 + (r-a_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{\sqrt{4a_3^2 a_2^2 - [(z-d_1)^2 + (r-a_1)^2 - a_3^2 - a_2^2]^2}}\right). \quad (9)$$

3. Planteamiento del problema

Sea $m(t) = [m_x(t), m_y(t), m_z(t)]^T$ una trayectoria preestablecida continua en el tiempo. El objetivo de este trabajo es diseñar un algoritmo de control para un robot manipulador antropomórfico de 3 grados de libertad tal que

- Se logre el seguimiento asintótico de una trayectoria preestablecida, i.e.

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

4. Diseño del algoritmo de control

Se considera el espacio de configuración del robot, donde cada articulación está bajo la influencia de un campo potencial U , estos campos potenciales deben ser construidos de tal forma que muevan a las articulaciones hacia la dirección de declive, moviendo al robot de una configuración inicial a una configuración final deseada (Spong *et al.*, 2020). En otras palabras, el método considera a cada articulación moviéndose sobre un campo de fuerza virtual y los objetivos deseados deben ejercer una fuerza gravitatoria sobre ellos. Para lograr esto, se utiliza el gradiente descendiente. En este caso, el gradiente negativo de U puede interpretarse como la fuerza que actúa sobre el robot en su espacio de configuración.

$$F_i(\theta_i) = -\nabla U_i(\theta_i). \quad (10)$$

Usando la metodología estándar de los APF's, estos se definen como una función cuadrática de la distancia euclidiana entre una configuración inicial θ_i y una configuración final θ_{fi} .

$$U_i = \frac{1}{2} (k_i \|\theta_i - \theta_{fi}\|^2), i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

donde k_i son los parámetros de diseño para cada articulación que sirven para escalar los efectos del APF.

El gradiente de U_i está dado por

$$\nabla U_i(\theta_i) = k_i(\theta_i - \theta_{fi}), i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

La fuerza atractiva es un vector que apunta a θ_{fi} con magnitud relacionada con la distancia entre θ_i y θ_{fi} .

$$F_i(\theta_i) = -k_i(\theta_i - \theta_{fi}), i = 1, \dots, n. \quad (13)$$

4.1. Algoritmo con el gradiente descendiente

La idea es simple, comenzando con la primera condición, se da un pequeño paso en la dirección del gradiente negativo (la dirección que puede disminuir lo más rápido posible) (Spong *et al.*, 2020). Esto nos lleva a otra solución y el proceso se repite hasta llegar a la configuración final.

1. $\theta^i = \theta_{ini}$, $i = 0$

2. if($\theta^i \neq \theta_f$)
 $\theta^{i+1} = \theta^i + \alpha^i \frac{F(\theta^i)}{\|F(\theta^i)\|}$
 $i = i + 1$
 } else{
 return($\theta^0, \dots, \theta^i$)
 }

3. GOTO 2

En este algoritmo la notación θ^i es usada para denotar el valor de θ en la i -ésima iteración. El valor del escalar α_i determina el tamaño de paso de la i -ésima iteración y se multiplica por el vector unitario en la dirección de la fuerza resultante, el ajuste de ese valor se encuentra a través de la experimentación y se

recomienda ser pequeño (Spong *et al.*, 2020); para este trabajo, se tomará $\alpha_i = 0,1$. El algoritmo presentado toma la articulación θ^i como un punto en el espacio de configuración que debe moverse por un campo atractivo hasta llegar a θ_f . Dado que el robot manipulador presentado posee tres articulaciones, se debe realizar el algoritmo para cada variable articular, por lo tanto, se tomará al robot manipulador desde sus articulaciones como tres puntos en el espacio, independientes entre sí. En la Figura 4 se muestra el diagrama a bloques del control implementado.

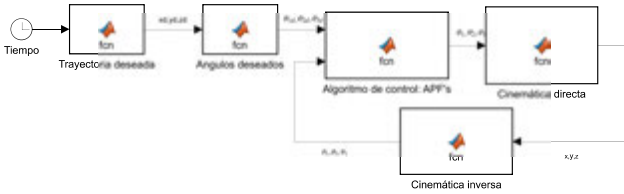


Figura 4: Diagrama a bloques del algoritmo de control.

5. Validación numérica

A continuación se presentan las simulaciones para validar la funcionalidad del algoritmo propuesto y evaluar su desempeño. Para llevarlas a cabo se utilizaron los parámetros físicos de los eslabones que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros físicos del manipulador

Eslabón	a_i	d_i	θ_i
1	$a_1 = 0,015m$	$d_1 = 0,1m$	$\theta_1 \in (0, \pi)$
2	$a_2 = 0,12m$	0	$\theta_2 \in (0, \pi)$
3	$a_3 = 0,09m$	0	$\theta_3 \in (0, \pi)$

5.1. Simulación I

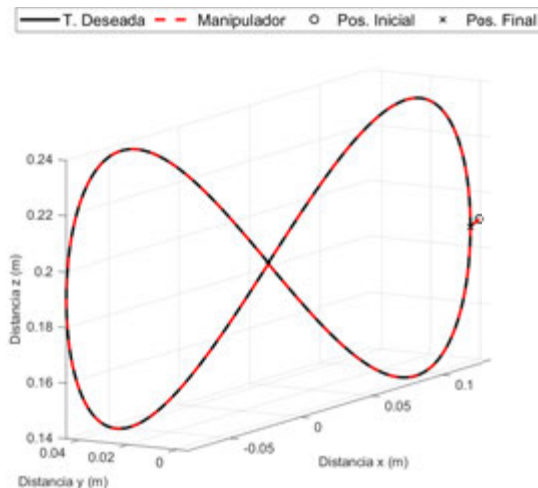


Figura 5: Trayectoria del efector final del manipulador.

La trayectoria deseada es una lemniscata de Bernoulli en 3D que viene dada por

$$m_1(t) = [m_x(t), m_y(t), m_z(t)]^T, \quad (14)$$

donde

$$m_x(t) = 0,1 \left(\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right) + 0,02,$$

$$m_y(t) = 0,025 \left(\cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \pi\right) \right) + 0,02,$$

$$m_z(t) = 0,05 \left(\sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \right) + 0,19,$$

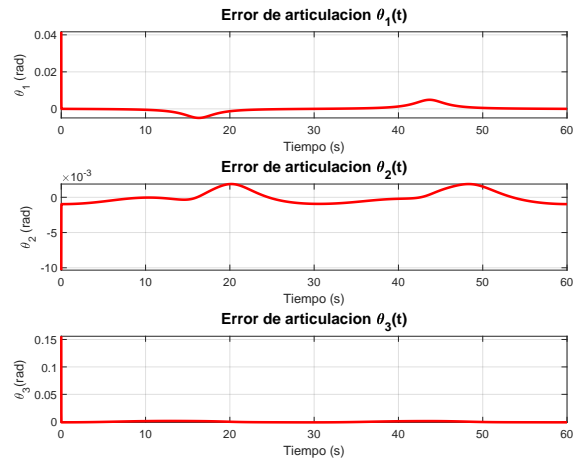


Figura 6: Errores de cada articulación.

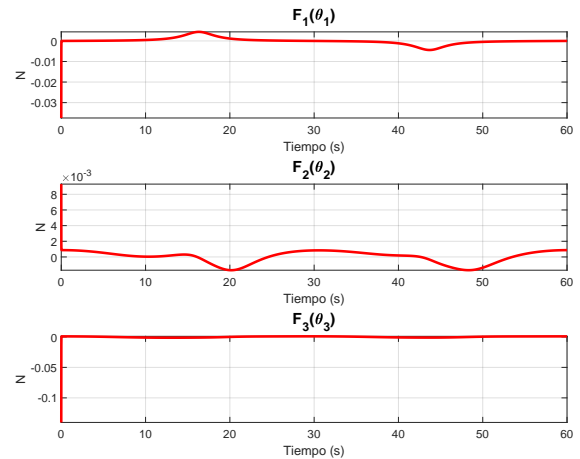


Figura 7: Gráfica del gradiente descendiente.

con periodo $T = 60s$. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. En la Figura 5 se muestra la trayectoria descrita por el efector final del robot manipulador, las condiciones iniciales para las articulaciones son $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0, \theta_3 = 0$ y los parámetros para el escalamiento del gradiente U son $k_1 = k_2 = k_3 = 0,9$. Se observa como se logra el seguimiento. En la Figura 6 se muestran los errores de articulación, como se puede apreciar, los errores convergen a una vecindad cercana a cero, de esta manera se puede validar la eficacia del algoritmo.

Posteriormente, las gráficas de la Figura 7 muestran el comportamiento de los gradientes descendientes y por último, la Figura 8 presenta las gráficas de los valores de las articulaciones.

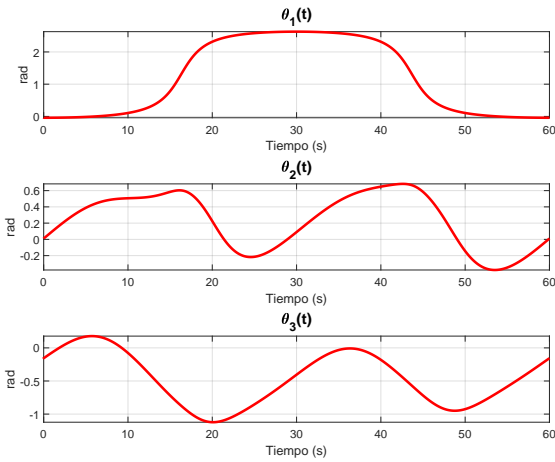


Figura 8: Gráfica de los ángulos de articulación.

5.2. Simulación II

La trayectoria deseada es un paraboloides con ecuaciones paramétricas dadas por

$$m_2(t) = [m_x(t), m_y(t), m_z(t)]^T, \quad (15)$$

donde

$$m_x(t) = r \left(\cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right) + 0,055,$$

$$m_y(t) = r \left(\sin \left(\frac{(1/3)\pi t}{T} \right) \right) + 0,005,$$

$$m_z(t) = r \left(\sin \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right) + 0,2,$$

con periodo $T = 60s$ y $r = 0,08m$. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. En la Figura 9 se muestra la trayectoria descrita por el efector final del robot manipulador, las condiciones iniciales para las articulaciones son $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$ y los parámetros para el escalamiento del gradiente U son $k_1 = k_2 = k_3 = 0,9$. En la Figura 10 se muestran los errores de articulación, como se puede apreciar, los errores convergen a una vecindad cercana a cero, de esta manera se puede validar la eficacia del algoritmo. Posteriormente, las gráficas de la Figura 11 muestran el comportamiento de los gradientes descendientes y por último, se presentan las gráficas de los valores de las articulaciones en la Figura 12.

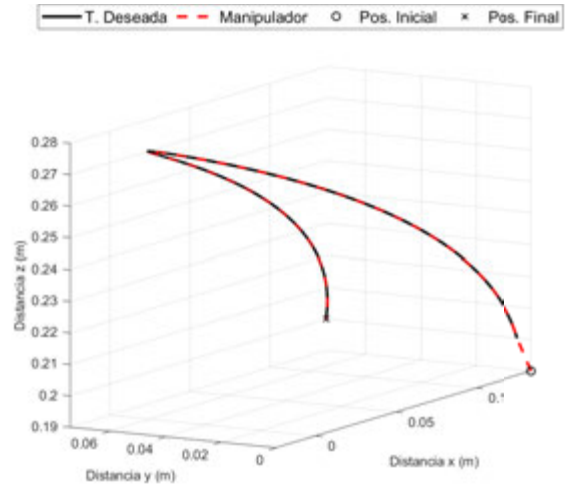


Figura 9: Trayectoria del efector final del manipulador.

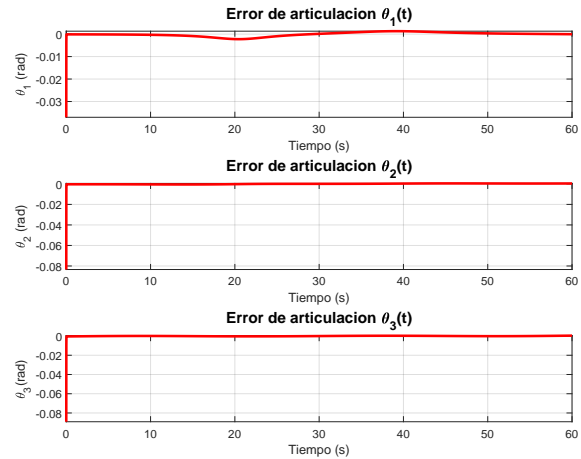


Figura 10: Errores de cada articulación.

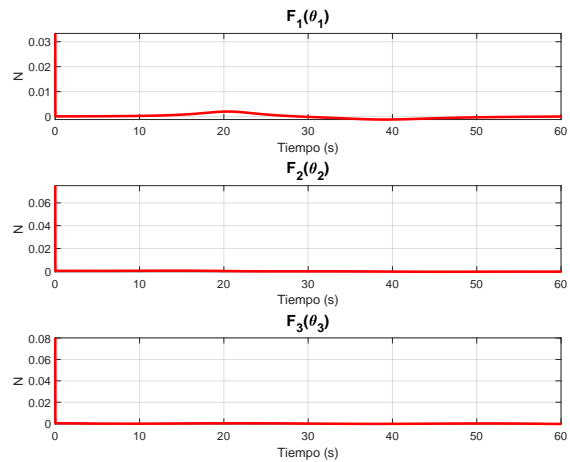


Figura 11: Gráfica del gradiente descendiente.

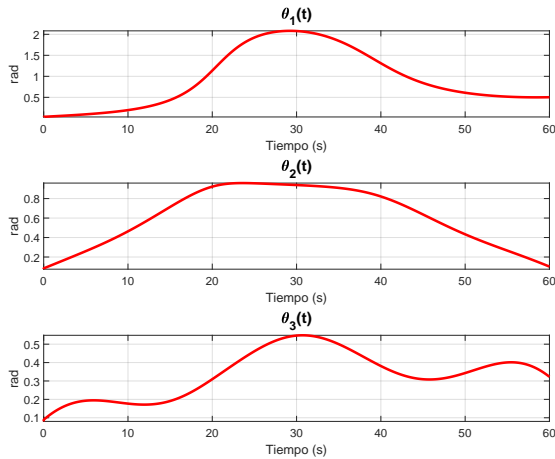


Figura 12: Gráfica de los ángulos de articulación.

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta un algoritmo de control para lograr el seguimiento de una trayectoria en el espacio utilizando la teoría de campos potenciales artificiales, aplicados a un robot manipulador antropomórfico de tres grados de libertad. Se obtiene la cinemática del manipulador y se realiza la validación numérica de los resultados teóricos.

Como trabajo futuro a corto plazo, se pretende implementar el algoritmo sobre una plataforma experimental como la que se muestra en la Figura 13 utilizando un sistema de cámaras Optitrack para la captura del movimiento del manipulador y una placa de desarrollo ESP32 con ROS para controlar los servomotores del manipulador. El algoritmo de control se realizará en una PC con sistema operativo Ubuntu y ROS, programado en Python. Se crearán nodos que se conectarán a través de una red Wifi para realizar la comunicación entre los dispositivos.

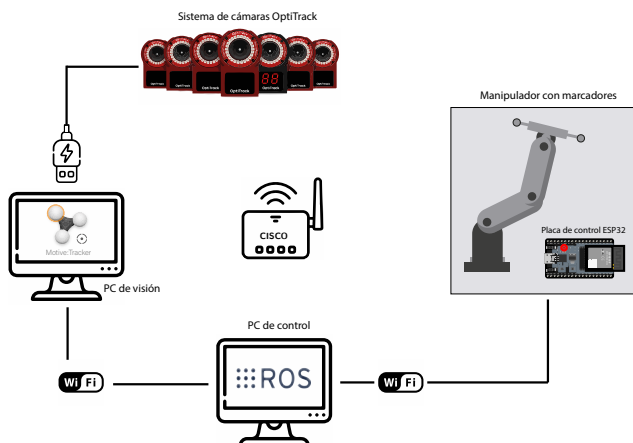


Figura 13: Plataforma experimental.

Referencias

- Andueza, L. y Aguirre, I. (2008). Diseño de un manipulador robótico con tres grados de libertad para fines educativos. *Ciencia e Ingeniería*, 30(1):3–13.
- Badawy, A. (2014). Manipulator trajectory planning using artificial potential field. En *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. IEEE.
- Chen, Z., Ma, L., y Shao, Z. (2019). Path planning for obstacle avoidance of manipulators based on improved artificial potential field. En *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*. IEEE.
- Cheng, T.-t., Ma, F., y Wu, Q. (2017). An artificial potential field-based simulation approach for maritime traffic flow. En *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE.
- Colorado, R. M. (2016). *Cinemática y dinámica de robots manipuladores*. Alpha Editorial.
- Cortes, F. R. (2020). *Robotica: control de robots manipuladores*. Marcombo.
- Craig, J. J. (2006). *Introduction to Robotics*. Pearson Educacion.
- Dang, A. D. y Horn, J. (2015). Collinear formation control of autonomous robots to move towards a target using artificial force fields. En *2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*. IEEE.
- Fernández, A. y Marrero-Osorio, S. A. (2017). Modelos cinemático y dinámico de un robot de cuatro grados de libertad. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 38(3):56–75.
- Gonzalez-Sierra, J., Santiaguillo-Salinas, J., y Aranda-Bricaire, E. (2016). Reciprocal collision avoidance for a group of second order agents. En *2016 XVIII Congreso Mexicano de Robótica*. IEEE.
- Guan, W., Weng, Z., y Zhang, J. (2015). Obstacle avoidance path planning for manipulator based on variable-step artificial potential method. En *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. IEEE.
- Jia, Q. y Wang, X. (2010). An improved potential field method for path planning. En *2010 Chinese Control and Decision Conference*. IEEE.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98.
- Lechuca-Gutiérrez, L. R. y Domínguez-Ramírez, O. A. (2022). Cinemática inversa basada en gradiente descendente cuaterniónico para cadenas cinemáticas. *Pãdi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial5):131–139.
- Ramírez-López, L. A. y Martínez-Aragón, M. (2022). Seguimiento de trayectorias mediante cinemática diferencial aplicado en robots manipuladores. *Pãdi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial6):86–90.
- Shahzad, A., Gao, X., Yasin, A., Javed, K., y Anwar, S. M. (2020). A vision-based path planning and object tracking framework for 6-dof robotic manipulator. *IEEE Access*, 8:203158–203167.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., y Vidyasagar, M. (2020). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons.
- Vergara-Hernandez, R., Maga a Méndez, M. A., Ramos-Fernández, J. C., y Hernández-Cortés, T. (2023). Analisis cinemático utilizando cuaterniones duales. *Pãdi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20):52–60.
- Yang, M., Jiang, Y., y Sun, J. (2017). Research on trajectory planning of manipulator based on ga - apf algorithm. En *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE.