

Análisis cinemático y modelo digital de un exoesqueleto de miembro superior con tres grados de libertad

Fabian Diaz-Palencia¹, Carlos Borrás-Pinilla², Cecilia García-Cena³

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: fahodipa@correo.uis.edu.co

² Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: cborras@uis.edu.co

³ E.T.S. de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: cecilia.garcia@upm.es

Resumen

En muchas situaciones, el comportamiento de los sistemas físicos puede expresarse mejor a través de modelos analíticos y digitales. En este trabajo, se desarrolla el modelo cinemático de un exoesqueleto de miembro superior con 3 grados de libertad y se presenta una herramienta de simulación virtual. El diseño mecánico del exoesqueleto se realiza en Solidworks; el modelo cinemático se basa en el esquema paramétrico de Denavit-Hartenberg (D-H), y el modelo digital equivalente del diseño se obtiene del módulo Simscape de Matlab, donde se valida la cinemática directa. Se demuestra que, utilizando el modelo desarrollado, el efector final del exoesqueleto puede apuntar a las coordenadas deseadas, que la articulación q3 no afecta la velocidad lineal del efector final en ninguna dirección específica en el espacio de trabajo y solo influye en su orientación. El enfoque presentado en este trabajo también puede aplicarse para resolver el problema cinemático de otros tipos similares de exoesqueletos y manipuladores robóticos.

Palabras clave: Modelo digital, exoesqueleto, cinemática directa, Denavit-Hartenberg

Abstract

In many situations, the behavior of physical systems can often be expressed through analytical and digital models. In this work, the kinematic model of a 3-degree-of-freedom upper limb exoskeleton is developed, and a virtual simulation tool is presented. The mechanical design of the exoskeleton is developed in Solidworks; the kinematic model is based on the Denavit-Hartenberg (D-H) parametric scheme, and the equivalent digital model of the design is obtained from the Simscape module of Matlab, where the direct kinematic model is validated. It is demonstrated that using the developed model, the end effector of the exoskeleton can point to the desired coordinates, that the q3 joint does not affect the linear velocity of the end effector in any specific direction in space; it only influences its orientation. The approach presented in this work can also be applied to solve the kinematic problem of other similar types of exoskeletons and robotic manipulators.

Keywords: Digital model, exoskeleton, direct kinematics, Denavit-Hartenberg

1. Introducción

En los últimos años, se ha prestado gran atención a los exoesqueletos como una posible solución para aumentar o sustituir las funciones motoras humanas [1]. Estos dispositivos no solo ayudan a las personas con movilidad reducida a realizar actividades diarias, sino que también pueden mejorar la capacidad de movimiento en personas con funciones motoras deterioradas [2]. Los movimientos de los miembros superiores humanos requieren un amplio rango de

trabajo y al controlar un exoesqueleto de miembro superior, se deben manejar modelos matemáticos altamente no lineales. Por ello, es crucial definir su cinemática, describiendo analíticamente cómo la posición y orientación del efector final se relacionan con las coordenadas articulares. La cinemática de cualquier robot manipulador tiene dos tipos de soluciones: cinemática directa y cinemática inversa.

En robótica, la cinemática directa, se utiliza para determinar la posición y orientación del efector final

basándose en los ángulos de rotación de las articulaciones del robot. Mientras en la cinemática inversa, debe identificarse un conjunto de variables articulares para la posición y orientación dadas del efector final [3].

Existen muchos tipos de métodos de solución para la cinemática de un robot. Un método de solución para cinemática directa consiste en concatenar transformaciones entre tramas situadas en eslabones vecinos de la cadena. En cinemática inversa, existen métodos analíticos, métodos numéricos y métodos basados en aprendizaje automático[3].

Por otro lado, una herramienta de la Industria 4.0 que ha captado gran interés por sus resultados revolucionarios es la tecnología de Gemelo Digital [4][5]. Esta tecnología es aplicable a diversas industrias como la automovilística, aeroespacial, manufacturera y agrícola [6][7][8]; y ha mostrado un impacto significativo en la atención médica [9][10].

Dassault Systèmes, a través del Living Heart Project, trabajó con un amplio grupo interdisciplinario para desarrollar y validar modelos digitales de corazón humano de alta precisión. Este proyecto demostró la viabilidad de modelar la función cardíaca completa dentro de un entorno basado en elementos finitos [11], abriendo el camino a nuevos proyectos como the Living Brain y the Living Lung.

Según el nivel de integración, un gemelo digital puede clasificarse en tres categorías [12]:

- **Modelo digital:** No tiene ninguna forma de intercambio automático de datos entre el objeto físico y el digital.
- **Sombra digital:** Existe un flujo de datos automático desde el modelo físico al digital.
- **Gemelo digital:** La integración entre los modelos físicos y digitales es bidireccional Figura 1.

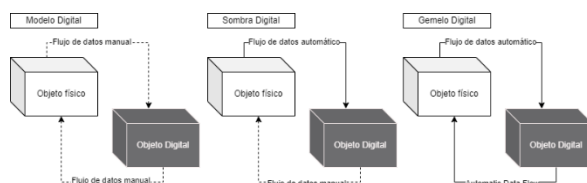


Figura 1 clasificación de gemelo digital de acuerdo con nivel de integración. Adaptado de [12]

Basados en lo anterior, el objetivo del presente trabajo se centra en implementar el modelo digital de un exoesqueleto de miembro superior para validar su cinemática y amplitud de movimiento. El modelo digital se creó utilizando software de diseño asistido

por ordenador, lo que permitió una representación detallada de la estructura y sus componentes.

1.1. Robots de rehabilitación para miembro superior

Se clasifican en dos categorías principales: el efector final, el cual funciona mientras está unido a la parte final de la cadena cinemática y el exoesqueleto el cual se ajusta alrededor del miembro del paciente. Están compuestos por articulaciones activas y pasivas, un sistema de alimentación (que suelen ser actuadores eléctricos) y sensores para medir el par aplicado por los motores, la posición en el espacio o para captar señales biológicas [13] [14] que permiten el control de los movimientos de la extremidad afectada [2], [15], [16]; son altamente personalizables, lo que permite a los terapeutas ajustar los parámetros según las necesidades y capacidades individuales de los pacientes [17]. También pueden emplear interfaces cerebro-ordenador para permitir que los movimientos sean controlados por señales cerebrales, lo que aumenta la precisión y la interacción con el robot [17]–[21].

En [22] presentan un modelo cinemático de un sistema robótico de rehabilitación del miembro superior basado en el método de parámetros (D-H), [23] presenta un análisis cinemático completo de un brazo robótico de 6 grados de libertad, utilizando el método (D-H). En este trabajo [24] se definió un modelo (D-H) del miembro superior para expresar el ángulo articular de acuerdo con ciertas directrices y permitir la definición de las restricciones biomecánicas adecuadas, [25] se centra en mejorar el rendimiento de los dispositivos exoesqueleto con sensores mediante un modelo de robot exoesqueleto de extremidades superiores con seis grados de libertad basado en el enfoque (D-H).

En [2] presentan una revisión de los exoesqueletos auxiliares actuales para asistir los movimientos de extremidades superiores en adultos mayores, especificando sus características técnicas como grados de libertad, materiales, mecanismos, sistemas de control y actuadores. También discuten los desafíos pendientes en su desarrollo, actuación y control. En [13] presentan un enfoque para controlar el exoesqueleto usando señales de electromiografía (sEMG), control neuronal adaptativo y un modelo musculoesquelético del miembro superior humano, señalan desafíos como zonas muertas en las articulaciones del robot y falta de conocimiento de su dinámica. Para enfrentarlos, se propone un control adaptativo y una calibración experimental del modelo.

En [26] evalúan cómo la interacción física humano-robot facilita las capacidades humanas, enfocándose en la detección de intenciones, el arbitraje y la retroalimentación para rehabilitación y prótesis de miembros

superiores. [27] aborda la decodificación continua y simultánea de movimientos de hombro, codo y muñeca a partir de señales electromiográficas para el control de exoesqueletos, demostrando un buen rendimiento tanto en población sana como con accidentes cerebrovasculares, aunque disminuye con la suavidad del movimiento en este último grupo.

En resumen, la revisión muestra que, aunque se han logrado avances significativos, aún existen retos por abordar relacionados con los sistemas de control, modelado dinámico, entre otros, de allí que el estudio preciso de la cinemática sea fundamental para garantizar una correspondencia adecuada en todos los aspectos del usuario.

2. Metodología

2.1. Modelo digital del exoesqueleto.

En el presente trabajo, se ha desarrollado un modelo digital de exoesqueleto para miembro superior utilizando el software de diseño asistido por computadora (CAD) Solidworks. El diseño del exoesqueleto se fundamenta en el análisis biomecánico de los movimientos de flexión-extensión del hombro y codo, así como de la pronosupinación del antebrazo, como se ilustra en la Figura 2. Donde las articulaciones glenohumeral en el hombro además de radio-cubital proximal y humero-cubital en el codo son las principales responsables de dichos movimientos y con el objetivo de replicarlos fielmente, en el diseño del exoesqueleto se ha contemplado la incorporación de una combinación de pares cinemáticos rotacionales accionados por actuadores específicos, que producirán los movimientos de forma análoga a la biomecánica humana, permitiendo asistir o complementar los movimientos naturales del miembro superior del usuario, con la intención de brindar un soporte funcional y ergonómico durante las tareas cotidianas.

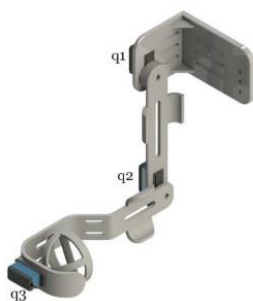


Figura 2 Modelo digital del exoesqueleto

Posteriormente se procedió a importar el modelo digital del exoesqueleto de miembro superior desde el entorno de simulación multicuerpo Simscape de

MATLAB. Esta plataforma de modelado y simulación permitió incorporar de manera precisa una copia de la geometría y las propiedades inerciales de los eslabones obtenidos previamente en Solidworks facilitando la asignación de los actuadores correspondientes a las articulaciones del exoesqueleto, de acuerdo con la configuración establecida Figura 3.

Este modelo digital ofrece múltiples ventajas en el proceso de diseño y desarrollo. Permite realizar cálculos precisos, validar parámetros, simular movimientos y realizar pruebas de seguridad sin riesgos. Facilita la optimización del diseño, reduce costos y tiempo al disminuir la necesidad de prototipos físicos, y se integra con otras herramientas de simulación y análisis.

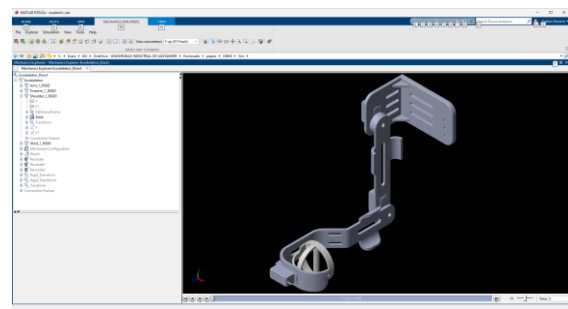


Figura 3 Modelo digital importado desde Simscape de Simulink Matlab

2.2. Análisis cinemático

Para el análisis cinemático del exoesqueleto de miembro superior propuesto, se empleó la metodología sistemática de (D-H). Este enfoque permitió determinar la posición y orientación del efector final respecto al sistema de referencia establecido en la articulación del hombro del usuario, la Figura 4 ilustra los sistemas de coordenadas asignados a cada articulación según la convención de (D-H), cuyos parámetros geométricos correspondientes se detallan en la Tabla I. En esta configuración cinemática, la variable articular q_1 representa el actuador responsable del movimiento antropométrico del hombro, mientras que q_2 y q_3 controlan los movimientos de flexión y extensión del codo, y pronación-supinación del antebrazo respectivamente. Cabe destacar que el eslabón final del sistema de cadena cinemática abierta se manifiesta en el punto de sujeción que el usuario usará para tomar con su mano el exoesqueleto.

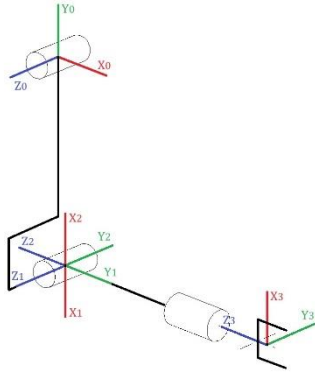


Figura 4 Diagrama esquemático de las coordenadas de las articulaciones del modelo digital por (D-H).

Tabla 1 Parámetros (D-H) para el modelo digital de exoesqueleto

	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$q_1 - \pi/2$	0	l_1	0
2	$q_2 - \pi$	0	0	$-\pi/2$
3	q_3	$l_2 + l_3$	0	0

Según la convención de (D-H), la descripción cinemática de cada articulación se realiza mediante una transformación homogénea que representa una rotación alrededor del eje Z, seguida de una traslación a lo largo del mismo eje, y posteriormente a lo largo del eje X [28]. La representación matricial de la posición final del exoesqueleto en el sistema de coordenadas base (ecuaciones cinemáticas) viene dada por lo siguiente.

$$\mathbf{H}_3^0 = \mathbf{H}_1^0 \mathbf{H}_2^1 \mathbf{H}_3^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{r} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde el vector de posición del efector final es.

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}^T$$

$$p_x = d_1 S(q_1) - C(q_1 + q_2)(l_2 + l_3)$$

$$p_y = -S(q_1 + q_2)(l_2 + l_3) - l_1 C(q_1)$$

$$p_z = 0$$

Los elementos de la matriz, que representan la rotación del sistema de coordenadas del efector final son.

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T$$

$$n_x = -S(q_1 + q_2)C(q_3)$$

$$n_y = C(q_1 + q_2)C(q_3)$$

$$n_z = -S(q_3)$$

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} o_x & o_y & o_z \end{bmatrix}^T$$

$$o_x = S(q_1 + q_2)S(q_3)$$

$$o_y = -C(q_1 + q_2)S(q_3)$$

$$o_z = -C(q_3)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}^T$$

$$r_x = -C(q_1 + q_2)$$

$$r_y = -S(q_1 + q_2)$$

$$r_z = 0$$

2.3. Validación

La validación del modelo digital del exoesqueleto se realizó comparando los parámetros de (D-H) con los datos obtenidos mediante la simulación en Matlab; por medio de una programación cinemática en bloques de cadena abierta Figura 5.

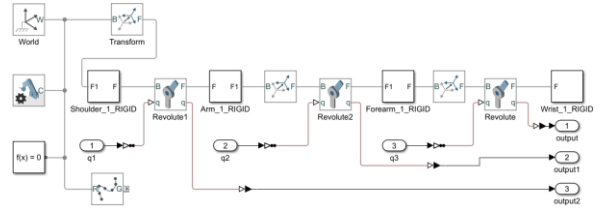


Figura 5 Programación de bloques de cadena abierta

Se definen las configuraciones angulares que se presentan en la tabla 2 dentro del rango de movimiento y se evalúan las matrices de transformación en cada configuración angular para determinar los valores de las coordenadas del efector final, posteriormente se realiza la simulación con el modelo digital para las mismas configuraciones angulares ver Figura 6 y de allí se extrae la posición del efector final

Tabla 2 Configuraciones angulares para validar la cinemática directa (D-H)

No	q_1	q_2	q_3
1	0	0	0
2	$-\pi/3$	$-\pi/6$	$\pi/6$
3	$-7\pi/18$	$-\pi/4$	$-\pi/6$
4	$-\pi/8$	$\pi/3$	$\pi/4$
5	$\pi/12$	$\pi/4$	$-\pi/4$
6	$\pi/10$	$-5\pi/18$	$\pi/9$
7	$\pi/9$	$-\pi/5$	$\pi/5$
8	$-4\pi/9$	$\pi/10$	$-\pi/8$

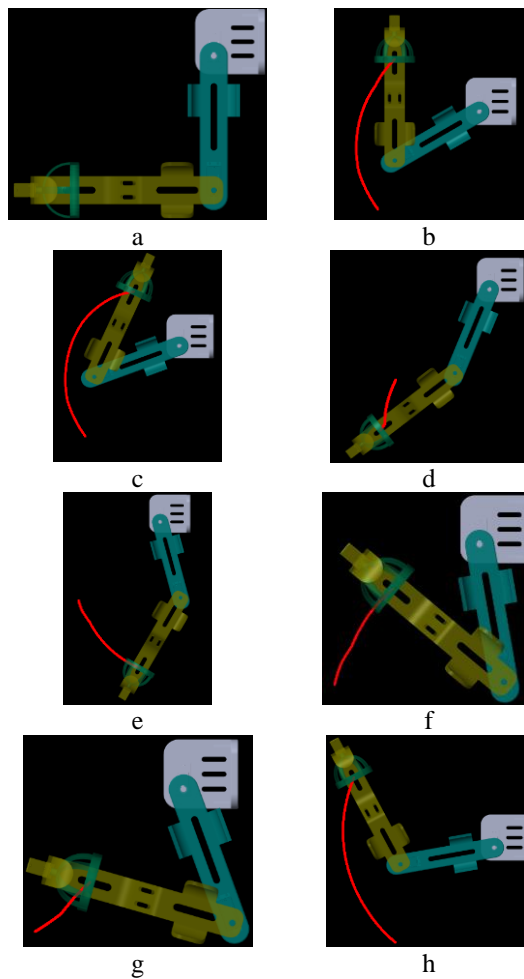


Figura 6 Posición del efector final del modelo del exoesqueleto para cada configuración angular

3. Resultados

En la Figura 7 se presentan las posiciones en X del efector final, así mismo la Figura 8 presenta sus posiciones en Y. La línea azul de las figuras representa la posición en función de la configuración angular q_1 y q_2 con (D-H) y la roja representa la posición extraída del modelo digital. En las Figuras 9 y 10 se presenta el error obtenido para cada configuración angular respectivamente y en general la Figura 11 enseña la distribución de errores. Se puede observar que la posición calculada por (D-H) se aproxima lo suficiente a la posición lograda en el modelo digital, por lo tanto, se valida que el modelo digital desarrollado puede proporcionar información precisa sobre la posición del efector final del exoesqueleto y sus articulaciones, los errores en un rango de 3-6 cm podrían considerarse significativos, sin embargo, no invalidan la utilidad del modelo digital.

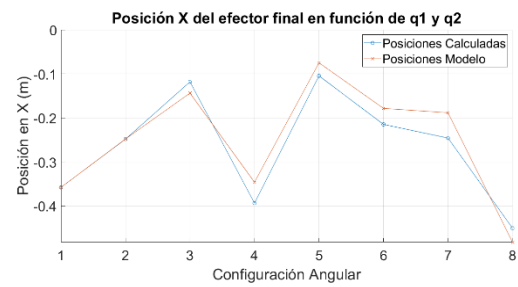


Figura 7 Posición X del efector final.

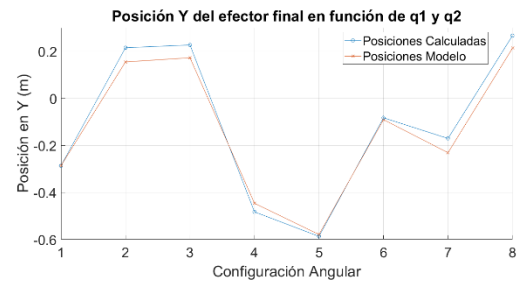


Figura 8 Posición Y del efector final.

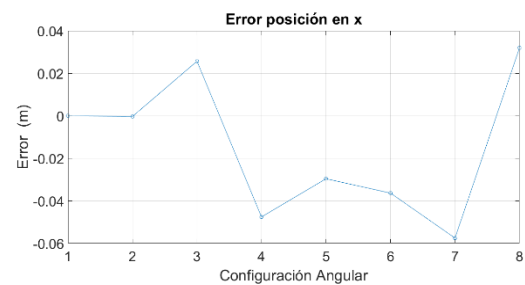


Figura 9 Error para cada configuración angular X



Figura 10 Error para cada configuración angular Y

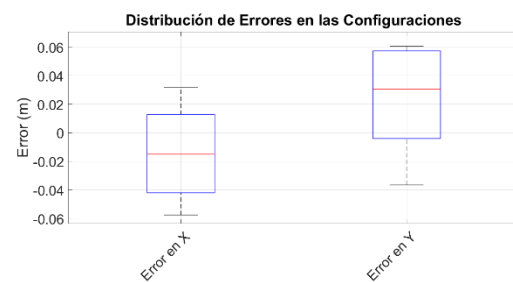


Figura 11 Boxplot del error

3.1. Análisis del espacio de trabajo

El espacio de trabajo del exoesqueleto, también denominado envolvente de trabajo, expresa su capacidad para alcanzar un área específica. Dada la información sobre el rango de movimiento (ROM) por sus siglas en inglés del miembro superior, el espacio de trabajo se ha calculado mediante el modelo digital. La Figura 11 ilustra la trayectoria operativa en coordenadas XY. Se puede observar que la articulación q3 no contribuye a la velocidad lineal del efector final en alguna dirección específica del espacio, solo contribuye en su orientación, por tanto, se calcula el jacobiano para dos grados de libertad articulaciones q1 y q2.

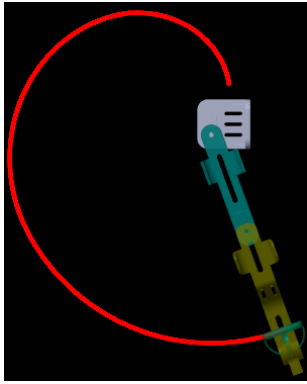


Figura 12 Trayectoria operativa

El jacobiano del modelo digital de exoesqueleto omitiendo la articulación q3 viene dado por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} l_1 S\left(\frac{\pi}{2} - q_1\right) - \sigma_1 & -\sigma_1 \\ l_1 C\left(\frac{\pi}{2} - q_1\right) + \sigma_2 & \sigma_2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\sigma_1 = (l_2 + l_3) \left(\frac{S(q_1 + q_2 - \pi)}{2} - \frac{S(q_1 + q_2 - 2\pi)}{2} \right)$$

$$\sigma_2 = (l_2 + l_3) \left(\frac{C(q_1 + q_2 - \pi)}{2} - \frac{C(q_1 + q_2 - 2\pi)}{2} \right)$$

3.1.1. Manipulabilidad

Los índices de desempeño evalúan la capacidad de un manipulador para transformar velocidades o fuerzas de los actuadores en el efector final. Se basan en la matriz jacobiana del manipulador, robot, etc. estos índices pueden usarse en la planificación de trayectorias para optimizar la generación de velocidades y fuerzas o mejorar la precisión del control del robot [29].

El índice de manipulabilidad propuesto por Yoshikawa viene dado por

$$w = \sqrt{\det(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)}$$

En robots no redundantes como el caso del exoesqueleto de este trabajo se tiene que el índice de manipulabilidad es igual al determinante del jacobiano.

$$w = \frac{l_1(l_2 + l_3) \left(S\left(q_2 - \frac{\pi}{2}\right) - S\left(q_2 - \frac{3\pi}{2}\right) \right)}{2}$$

En el caso donde el determinante del jacobiano es cero el exoesqueleto presenta una configuración singular que restringe su controlabilidad.

4. Conclusiones

Se desarrolló y validó con éxito un modelo cinemático basado en el esquema paramétrico de (D-H) para un exoesqueleto de miembro superior con tres grados de libertad, demostrando su capacidad para predecir con precisión la posición del efector final. La implementación de un modelo digital utilizando Solidworks y Simscape (Matlab) permitió una representación precisa del exoesqueleto, facilitando la validación del modelo cinemático y proporcionando una plataforma robusta para futuras optimizaciones y análisis. Se considera que las diferencias en la precisión numérica durante los cálculos pudieron llevar a los errores presentados. La metodología presentada, que combina modelado cinemático analítico y simulación digital, demuestra ser una herramienta eficaz para el diseño y desarrollo de exoesqueletos, reduciendo la necesidad de prototipos físicos y acelerando el proceso de iteración del diseño.

5. Agradecimientos

Este trabajo está soportado por la Vicerrectoría de investigaciones y extensión de la Universidad Industrial de Santander, bajo el proyecto VIE 2798 Semillero de Robótica y el laboratorio DICBoT. Fondos de la VIE-UIS que apoyan a los estudiantes de Pregrado, Maestría y Doctorado de la Universidad Industrial de Santander.

6. Referencias

- [1] A. C. de Oliveira *et al.*, “Exploring the Capabilities of Harmony for Upper-Limb Stroke Therapy,” *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, vol. 2019, pp. 637–643, Jun. 2019, doi: 10.1109/ICORR.2019.8779558.

- [2] A. Kapsalyamov, S. Hussain, and P. K. Jamwal, "State-of-the-art assistive powered upper limb exoskeletons for elderly," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 178991–179001, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026641.
- [3] M. S. Elhadidy, W. S. Abdalla, A. A. Abdelrahman, S. Elnaggar, and M. Elhosseini, "Assessing the accuracy and efficiency of kinematic analysis tools for six-DOF industrial manipulators: The KUKA robot case study," *AIMS Math.*, vol. 9, no. 6, pp. 13944–13979, 2024, doi: 10.3934/math.2024678.
- [4] Q. Qi *et al.*, "Enabling technologies and tools for digital twin," *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 3–21, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [5] B. He and K. J. Bai, "Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review," *Adv. Manuf.*, Mar. 2020, doi: 10.1007/s40436-020-00302-5.
- [6] A. A. Malik and A. Bilberg, "Digital twins of human robot collaboration in a production setting," *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 278–285, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.047.
- [7] M. Ayani, M. Ganebäck, and A. H. C. Ng, "Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning," *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 243–248, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139.
- [8] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, "Digital twin paradigm: A systematic literature review," *Comput. Ind.*, vol. 130, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [9] W. Shengli, "Is Human Digital Twin possible?," *Comput. Methods Programs Biomed. Updat.*, vol. 1, p. 100014, 2021, doi: 10.1016/j.cmpbup.2021.100014.
- [10] K. Bruynseels, F. S. de Sio, and J. van den Hoven, "Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm," *Front. Genet.*, vol. 9, no. FEB, pp. 1–11, 2018, doi: 10.3389/fgene.2018.00031.
- [11] B. Baillargeon, N. Rebelo, D. D. Fox, R. L. Taylor, and E. Kuhl, "The living heart project: A robust and integrative simulator for human heart function," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 48, no. 1, pp. 38–47, 2014, doi: 10.1016/j.euromechsol.2014.04.001.
- [12] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," Jan. 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [13] H. Majidi Fard Vatan, S. Nefti-Meziani, S. Davis, Z. Saffari, and H. El-Hussieny, "A review: A Comprehensive Review of Soft and Rigid Wearable Rehabilitation and Assistive Devices with a Focus on the Shoulder Joint," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 102, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s10846-021-01353-x.
- [14] M. Cardona, M. Destarac, and C. G. Cena, "Robotics for Rehabilitation: A State of the Art," in *Exoskeleton Robots for Rehabilitation and Healthcare Devices*, Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 1–11. doi: 10.1007/978-981-15-4732-4_1.
- [15] H. I. Krebs, B. T. Volpe, S. Hesse, A. C. Lo, J. Stein, and N. Hogan, "Rehabilitation robotics," in *DeLisa's Physical Medicine and Rehabilitation: Principles and Practice: Fifth Edition*, vol. 2–2, roberto Colombo and S. Vittorio, Eds. London, UK, 2012, pp. 2187–2200. doi: 10.4135/9781412950510.n683.
- [16] J. Brackenridge, L. V. Bradnam, S. Lennon, J. J. Costi, and D. A. Hobbs, "A review of rehabilitation devices to promote upper limb function following stroke," *Neurosci. Biomed. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 25–42, 2016, doi: 10.2174/2213385204666160303220102.
- [17] S. Dalla Gasperina, L. Roveda, A. Pedrocchi, F. Braghin, and M. Gandolla, "Review on Patient-Cooperative Control Strategies for Upper-Limb Rehabilitation Exoskeletons," *Front. Robot. AI*, vol. 8, no. December, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.745018.
- [18] P. Ofner, A. Schwarz, J. Pereira, and G. R. Müller-Putz, "Upper limb movements can be decoded from the time-domain of low-frequency EEG," *PLoS One*, vol. 12, no. 8, pp. 1–24, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0182578.
- [19] C. Freeman, *Control System Design for Electrical Stimulation in Upper Limb Rehabilitation*. Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-25706-8.
- [20] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, and N. Jarrassé, "Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: A review on control strategies," *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, vol. 9, pp. 4–14, 2016, doi: 10.1109/RBME.2016.2552201.
- [21] L. De Marzi and N. Peixoto, "EEG-EMG-based interface for upper limb exoskeleton--A review," 2022.
- [22] S. Guo, W. Zhang, W. Wei, J. Guo, Y. Ji, and Y. Wang, "A kinematic model of an upper limb rehabilitation robot system," *2013 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. IEEE ICMA 2013*, pp. 968–973, 2013, doi: 10.1109/ICMA.2013.6618046.
- [23] J. Iqbal, R. Islam, and H. Khan, "Modeling and analysis of a 6 DOF robotic arm manipulator Modeling and Analysis of a 6 DOF Robotic Arm Manipulator," vol. 3, no. October, 2015.

- [24] M. Caruso, L. Gastaldi, S. Pastorelli, A. Cereatti, and E. Digo, “An ISB-consistent Denavit-Hartenberg model of the human upper limb for joint kinematics optimization: validation on synthetic and robot data during a typical rehabilitation gesture,” *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 2022-July, no. June 2024, pp. 1805–1808, 2022, doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871201.
- [25] M. Liu, X. Zhou, and J. Bao, “Power-assisted Optimization Model of Heterogeneous Sensor Exoskeleton Devices Based on Swarm Intelligence Algorithm and Dynamics Optimization,” *Sensors Mater.*, vol. 36, no. 1, pp. 305–322, 2024, doi: 10.18494/SAM4649.
- [26] D. P. Losey, C. G. McDonald, E. Battaglia, and M. K. O’Malley, “A review of intent detection, arbitration, and communication aspects of shared control for physical human–robot interaction,” *Appl. Mech. Rev.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–19, 2018, doi: 10.1115/1.4039145.
- [27] J. Liu, Y. Ren, D. Xu, S. H. Kang, and L. Q. Zhang, “EMG-Based Real-Time Linear-Nonlinear Cascade Regression Decoding of Shoulder, Elbow, and Wrist Movements in Able-Bodied Persons and Stroke Survivors,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 67, no. 5, pp. 1272–1281, 2020, doi: 10.1109/TBME.2019.2935182.
- [28] B. Saeedi, M. M. Moghaddam, and M. Sadedel, “Conceptual Design and Characteristics of a New Wrist Rehabilitation Exoskeleton Based on Systematic Approach,” *11th RSI Int. Conf. Robot. Mechatronics, ICRoM 2023*, no. April, pp. 457–463, 2023, doi: 10.1109/ICRoM60803.2023.10412536.
- [29] H. A. Moreno, R. Saltaren, I. Carrera, L. Puglisi, and R. Aracil, “Índices de desempeño de Robots Manipuladores: Una revisión del estado del arte,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 9, no. 2, pp. 111–122, 2012, doi: 10.1016/j.riai.2012.02.005.

$$H_1^0 = \begin{pmatrix} S(q_1) & C(q_1) & 0 & d_1 S(q_1) \\ -C(q_1) & S(q_1) & 0 & -d_1 C(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$H_2^1 = \begin{pmatrix} -C(q_2) & 0 & S(q_2) & 0 \\ -S(q_2) & 0 & -C(q_2) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$H_3^2 = \begin{pmatrix} C(q_3) & -S(q_3) & 0 & 0 \\ S(q_3) & C(q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Anexo

$$H_i^{i-1} = \begin{pmatrix} C(\theta_i) & -S(\theta_i)c(\alpha_i) & S(\theta_i)s(\alpha_i) & a_i C(\theta_i) \\ S(\theta_i) & C(\theta_i)c(\alpha_i) & -C(\theta_i)s(\alpha_i) & a_i S(\theta_i) \\ 0 & S(\alpha_i) & C(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A continuación, los parámetros de DH se reemplazan para obtener las ecuaciones de transformación de desacoplamiento cinemático.