



Síntesis de un mecanismo flexible como pata de un robot caminador

Ir. P. Claret-Esquius¹, J. Puig-Ortiz², L. Jordi-Nebot², R. Pàmies-Vilà²

¹ Mechanical Engineer, TU Delft University, pitia.claret@gmail.com

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya, joan.puig@upc.edu; lluia.jordi@upc.edu; rosa.pamies@upc.edu

Los mecanismos rígidos tradicionales presentan limitaciones como desgaste mecánico, holgura, mayor número de piezas, peso elevado, costo y tiempo de ensamblaje prolongados, así como la necesidad de mantenimiento regular. La reducción de estos inconvenientes permite mejorar el rendimiento, la eficiencia y la viabilidad económica de los sistemas mecánicos.

Los mecanismos flexibles han demostrado ser una alternativa prometedora en múltiples disciplinas, incluyendo biomecánica, robótica y electrónica, al basar su movimiento en la flexión controlada de sus elementos en lugar de depender de articulaciones cinemáticas convencionales. No obstante, el desafío radica en seleccionar y optimizar la geometría y configuración de las uniones flexibles para cada aplicación específica. Este trabajo se centra en el diseño y la síntesis de un mecanismo flexible destinado a actuar como pata de un robot caminador, orientado a aplicaciones donde la adaptabilidad y la eficiencia energética son esenciales. Se propone un diseño inspirado en mecanismos de flexión controlada, que combina elementos elásticos con estructuras rígidas, permitiendo una amortiguación pasiva y adaptativa al terreno.

La metodología se basa en la integración de materiales de baja rigidez y geometrías especializadas, que proporcionan al mecanismo una capacidad de movimiento de múltiples grados de libertad sin necesidad de actuadores adicionales. Para lograrlo, se analizan distintos enfoques de diseño bioinspirados, aplicando principios de síntesis de mecanismos y optimización estructural, con el fin de obtener un balance entre estabilidad y flexibilidad en las distintas fases del ciclo de marcha del robot.

Los resultados de simulaciones y pruebas experimentales confirman que el mecanismo propuesto mejora la locomoción autónoma en terrenos irregulares sin la complejidad de sistemas de control avanzados. Con este desarrollo, se propone una alternativa innovadora para la locomoción robótica con potencial aplicación en robots de exploración y rescate que requieren movilidad autónoma en entornos impredecibles.

1. Introducción

El desarrollo de mecanismos flexibles ha experimentado un avance significativo gracias a la evolución de las capacidades de fabricación, la mejora en los materiales y el aumento del poder computacional. A diferencia de los mecanismos rígidos tradicionales, los mecanismos flexibles permiten la generación de movimiento a partir de la deflexión de sus componentes, lo que reduce la fricción, el número de piezas y los costos de producción [1,2].

En este contexto, el presente trabajo se centra en el diseño de un mecanismo flexible optimizado que funcione como una pata caminadora, cumpliendo con requisitos específicos de diseño. Este mecanismo debe operar en un plano bidimensional, facilitando así su análisis, diseño y posterior fabricación. Se emplean técnicas como el modelo de cuerpo pseudo-rígido (PRBM) y la optimización topológica para simplificar y mejorar el diseño. La verificación del mecanismo incluye simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEM) y pruebas experimentales.

El trabajo abarca desde la identificación de estrategias y técnicas de diseño hasta el análisis del comportamiento del mecanismo bajo diferentes condiciones de carga y movimiento. Con base a la revisión de literatura, se prioriza el desarrollo de un mecanismo simple, rentable y eficiente, evitando diseños complejos y costosos que emplean sistemas de control avanzados.

Finalmente, este trabajo proporciona un análisis detallado de las fuerzas y tensiones, así como de las relaciones entre las variables de diseño. Esto permite evaluar cómo se transmite el movimiento y las cargas en el mecanismo, sentando las bases para un diseño óptimo en términos de desempeño, fabricación y robustez.

2. Metodología

2.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales fijados son:

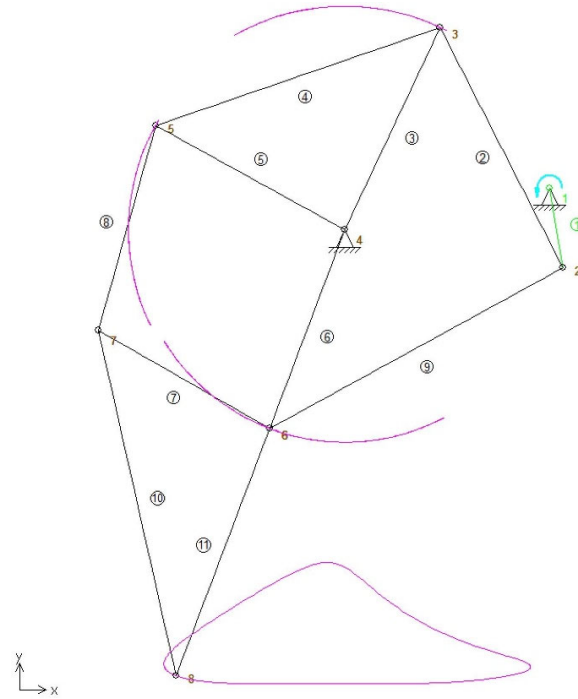
- Capacidad para soportar cargas de hasta 10 veces su propio peso (necesario para poder construir un robot caminador con todas sus partes).
- Funcionamiento en un plano 2D con dimensiones de 220 x 220 mm (área de trabajo de una impresora 3D común).
- Movimiento estable sin necesidad de sistemas de control externos.

Para cumplir con estos requisitos, el diseño del mecanismo se centró en minimizar su deformación total bajo carga, así como las tensiones presentes en las juntas flexibles, para garantizar un comportamiento cercano al equilibrio en todas las etapas del movimiento. Se priorizó el uso de materiales con alta resistencia y baja rigidez para lograr un equilibrio entre flexibilidad y durabilidad. Además, se diseñaron configuraciones que distribuyen las fuerzas de manera uniforme a través del mecanismo, evitando concentraciones de tensión que puedan comprometer su integridad.

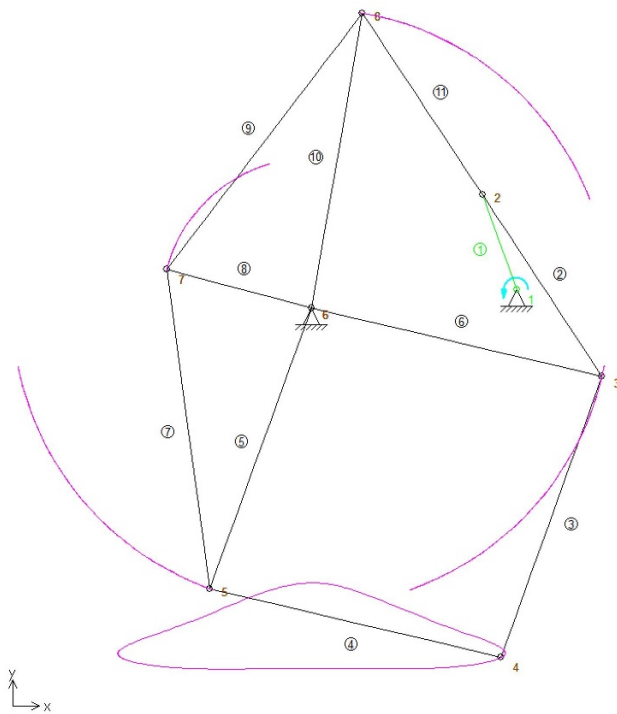
2.2. Selección cinemática

Se evaluaron varias configuraciones de mecanismos ya existentes, utilizando un análisis multicriterio basado en la complejidad, la trayectoria generada, el rango de movimiento articular y la configuración bajo carga. Entre ellos destacan:

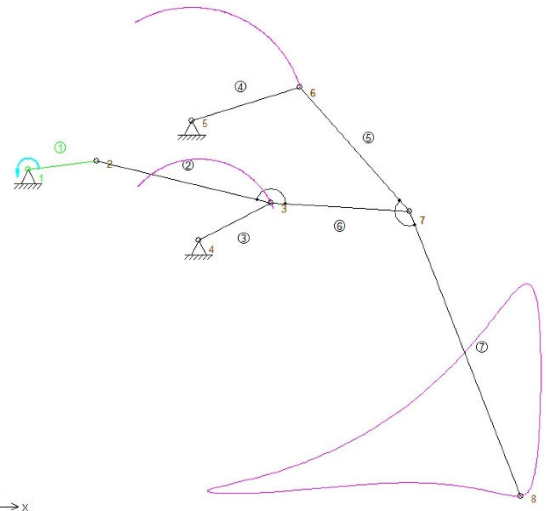
- El mecanismo de Theo Jansen [3,4,5] (Figura 1a): es un sistema de barras articuladas diseñado para imitar el movimiento fluido de las extremidades de los animales. Consiste en un conjunto de eslabones acoplados en un patrón preciso que convierte el movimiento rotatorio de una manivela en un desplazamiento estable y eficiente sobre el suelo. Su diseño permite la locomoción sin ruedas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en terrenos irregulares y ha sido popularizado por las esculturas móviles, llamadas "bestias de playa", creadas por Jansen.
- El mecanismo de Ghassaei [6] (Figura 1b): es una variante de los sistemas de locomoción basados en barras articuladas, que optimiza la trayectoria del pie para mejorar la estabilidad y la eficiencia del paso. Se enfoca en generar un desplazamiento más controlado y preciso, reduciendo el impacto en cada ciclo de movimiento y facilitando la adaptación a diferentes superficies.
- El mecanismo de Klann [7,8] (Figura 1c): es un sistema de patas mecánicas diseñado para sustituir ruedas en vehículos todo terreno. Se basa en un conjunto de eslabones que transforman la rotación de un eje en un movimiento de paso estable, permitiendo superar obstáculos de manera eficiente. A diferencia del mecanismo de Jansen, el de Klann prioriza una trayectoria más angular y robusta, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en robótica y exploración en terrenos difíciles.



(a) Mecanismo de Theo Jansen



(b) Mecanismo de Ghassaei



(c) Mecanismo de Klann

Figura 1: Mecanismos caminadores comunes.

Entre estos, el modelo seleccionado –representado en la Figura 2–, fue una versión modificada del mecanismo de Klann que ofrece un equilibrio óptimo entre simplicidad y rendimiento necesario para esta aplicación [9]. Además, tiene un rango de movimiento de las juntas frente a la distancia recorrida mayor que los otros candidatos, facilitando así el cambio a juntas flexibles. Esta pierna mecánica combina un mecanismo de cuatro barras y otro de cinco barras. El eslabón 1 actúa como entrada y transmite el movimiento al eslabón 2 y 3, formando el sistema de cuatro barras, que a su vez lo propaga a los demás eslabones, manteniendo ángulos fijos entre 2-5 y 6-7.

El eslabón 5, en la parte superior, puede diseñarse más rígido debido a su reducido rango de movimiento (ROM), permitiéndole soportar más carga que las articulaciones 2 y 7. La punta del mecanismo (eslabón 8) sigue una trayectoria cerrada, con un recorrido inferior plano para maximizar la tracción y un movimiento ascendente que facilita superar obstáculos de manera eficiente.

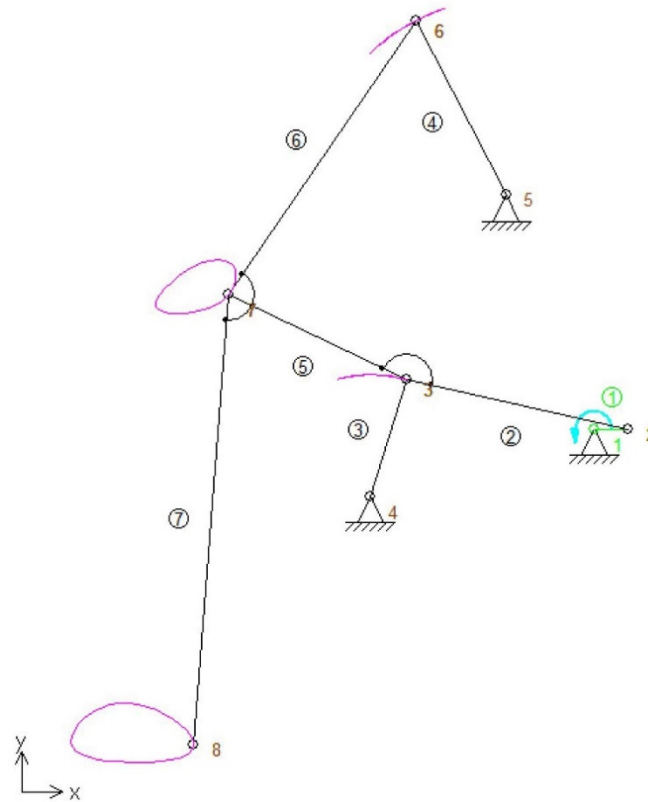


Figura 2: Mecanismo de Klann modificado.

2.3. Análisis cinemático y dinámico

Para estudiar el funcionamiento se plantearon las ecuaciones cinemáticas mediante el método de cierre de anillos y se realizaron simulaciones en MATLAB para calcular el rango de movimiento de cada articulación (ángulo relativo entre dos barras) y las fuerzas en las uniones. En la Figura 3, se presentan los anillos presentes, el primero de 4 barras y el segundo de 5 barras.

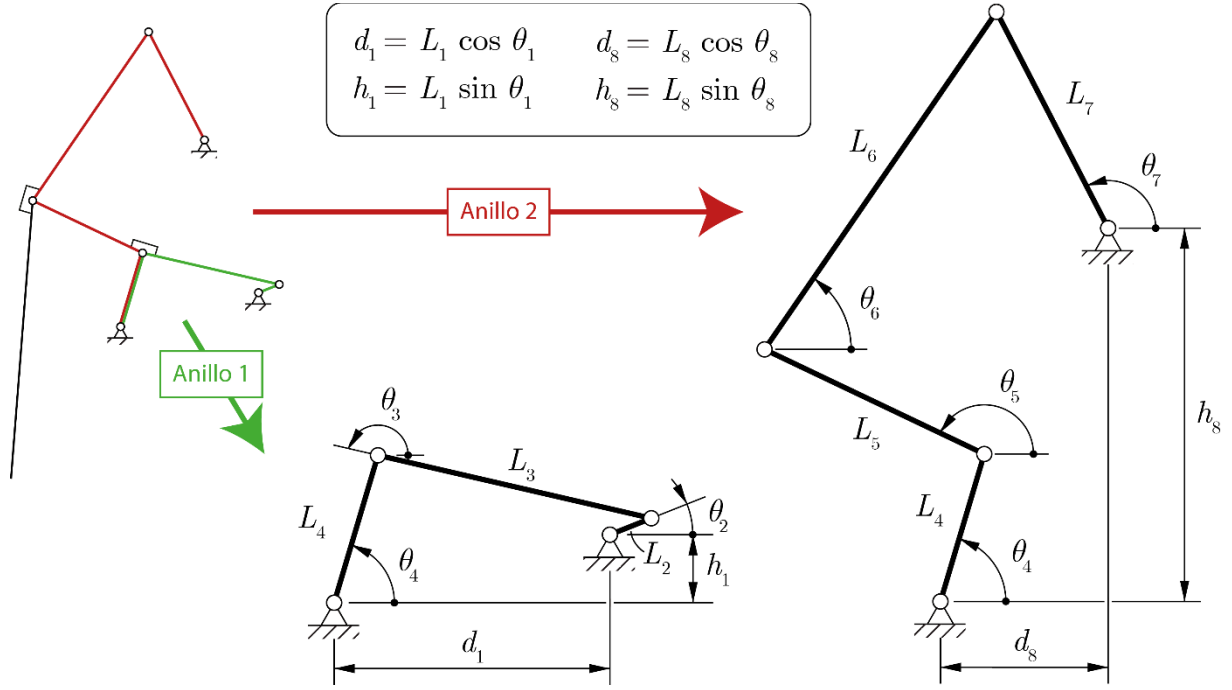


Figura 3: Formulación esquemática del sistema.

Las ecuaciones geométricas de enlace obtenidas son:

$$L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 - L_4 \cos \theta_4 = 0 \quad (1)$$

$$L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_4 = 0 \quad (2)$$

$$L_8 \cos \theta_8 + L_7 \cos \theta_7 - L_6 \cos \theta_6 - L_5 \cos \theta_5 - L_4 \cos \theta_4 = 0 \quad (3)$$

$$L_8 \sin \theta_8 + L_7 \sin \theta_7 - L_6 \sin \theta_6 - L_5 \sin \theta_5 - L_4 \sin \theta_4 = 0 \quad (4)$$

La figura 4 muestra la evolución de los distintos ángulos en función del ángulo girado por la manivela del mecanismo.

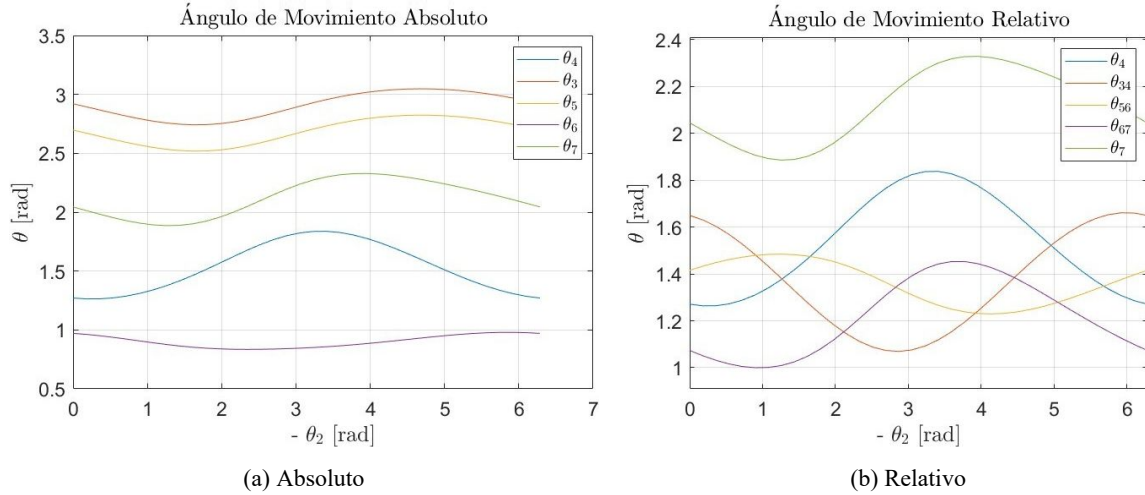


Figura 4: Ángulo de movimiento de las articulaciones en función del ángulo de la manivela del mecanismo.

Siguiendo con el análisis dinámico, se realizó el diagrama de sólido rígido para cada elemento con sus correspondientes ecuaciones de equilibrio. Además, se modelaron las juntas flexibles utilizando el modelo de cuerpo pseudo-rígido (PRBM) [10] para estimar la rigidez torsional, que representa que una articulación flexible puede modelarse como un momento en cada articulación. Aplicando estos conceptos se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$T_2 + T_3 = 0 \quad (5)$$

$$F_2 + F_3 = 0 \quad (6)$$

$$\Gamma_{in} + L_2(F_3 \cos \theta_2 - T_3 \sin \theta_2) = 0 \quad (7)$$

$$T_6 + T_5 - T_3 = 0 \quad (8)$$

$$F_6 + F_5 - F_3 = 0 \quad (9)$$

$$K_5\Phi_5 + K_6\Phi_6 - L_3[F_3 \cos(\theta_3 + \pi) - T_3 \sin(\theta_3 + \pi)] + L_5(F_6 \cos \theta_5 - T_6 \sin \theta_5) = 0 \quad (10)$$

$$T_4 - T_5 = 0 \quad (11)$$

$$F_4 - F_5 = 0 \quad (12)$$

$$K_4\Phi_4 - K_5\Phi_5 + L_4(T_5 \sin \theta_4 - F_5 \cos \theta_4) = 0 \quad (13)$$

$$-T_6 + T_8 - \mu P = 0 \quad (14)$$

$$-F_6 + F_8 + P = 0 \quad (15)$$

$$-K_6\Phi_6 + K_8\Phi_8 + L_6(F_8 \cos \theta_6 - T_8 \sin \theta_6) - PL(\cos \theta_L + \mu P \sin \theta_L) = 0 \quad (16)$$

$$T_7 - T_8 = 0 \quad (17)$$

$$F_7 - F_8 = 0 \quad (18)$$

$$K_7\Phi_7 - K_8\Phi_8 + L_7(T_8 \sin \theta_7 - F_8 \cos \theta_7) = 0 \quad (19)$$

Donde:

- T_i ; F_i : fuerza horizontal y vertical respectivamente en la articulación i
- θ_i : ángulo absoluto de la articulación i
- Γ_i : par motor de entrada
- P : carga externa
- $K_i\Phi_i = K_i(\theta_i - \theta_{i_0})$: momento de la articulación i

Suponiendo una carga externa de 1 kg, simulando el peso que sostendría una pata del robot caminador, se obtienen las fuerzas en las articulaciones y por lo tanto se puede seleccionar la unión flexible más adecuada.

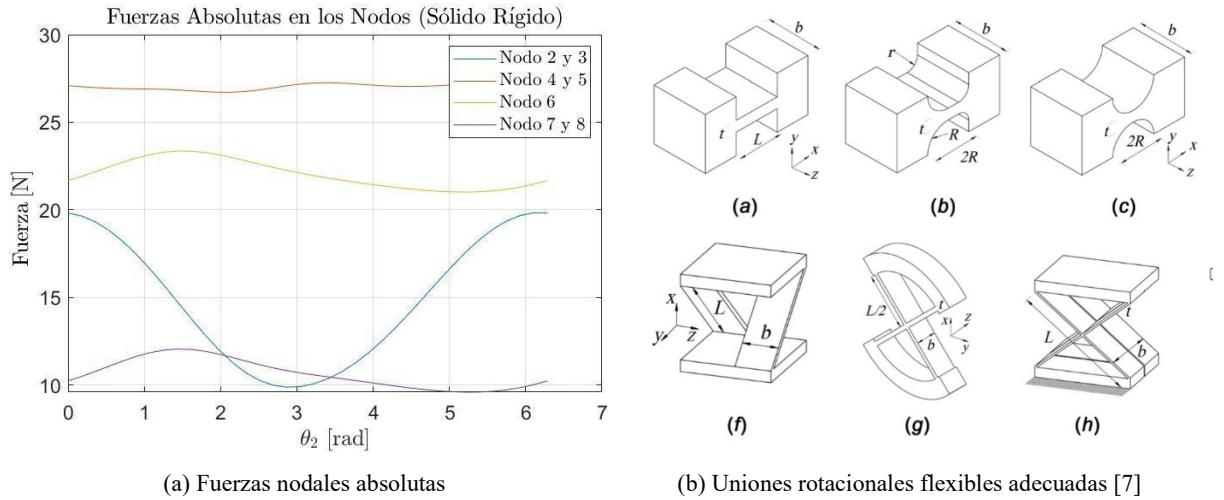
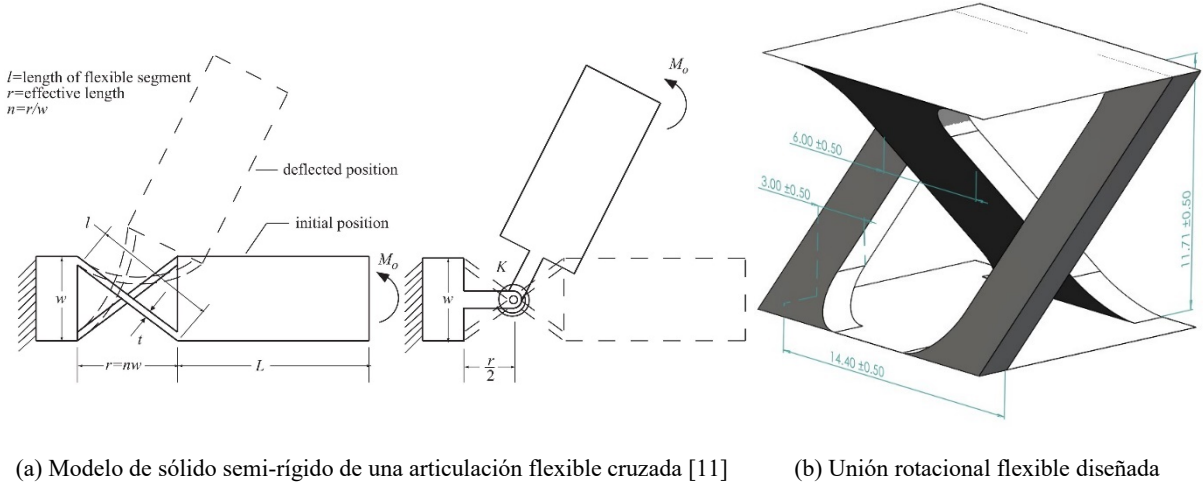


Figura 5: Uniones flexibles adecuadas en función de las fuerzas absolutas en las articulaciones.

Utilizando los resultados de la investigación desarrollada por Farhadi, Tolou and Herder [8] donde se modelan diferentes uniones flexibles rotacionales, y teniendo en cuenta el ángulo de movimiento y las fuerzas nodales, se encuentran los candidatos a unión flexible, presentados en la Figura 5b. De los presentes, y debido a su simetría y estabilidad de rigidez a lo largo de la deformación, se seleccionó la unión (f) de la Figura 5b que corresponde a la formulación mostrada en la Figura 6.



(a) Modelo de sólido semi-rígido de una articulación flexible cruzada [11] (b) Unión rotacional flexible diseñada

Figura 6: Modelo de la articulación flexible cruzada

Los parámetros de rigidez aplicados son:

$$K_{\theta} = 5300185 - 16866n + 0885356n^2 - 02093n^3 + 0018385n^4 \quad (6)$$

$$K = \frac{K_{\theta}EI}{2l} = 2.4882 \left[\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{rad}} \right] \quad (6)$$

2.4. Configuración inicial

Este apartado aborda la determinación de la configuración inicial óptima para maximizar la capacidad de carga del mecanismo y mejor movilidad. En este contexto, se enfatiza que las juntas flexibles deben ser orientadas de manera que trabajen principalmente bajo cargas de tensión, dado que esta condición permite a las juntas soportar mayores esfuerzos en comparación con cargas de flexión, compresión o torsión.

Para lograr esta optimización, se emplea un análisis computacional en MATLAB, mediante el cual se calcula la dirección óptima de las juntas para minimizar fuerzas no tensiles. Este análisis incluye la evaluación de las fuerzas máximas absolutas, sus direcciones y los ángulos iniciales asociados para cada articulación del mecanismo. Al compararlos, se identificó una trayectoria de carga adecuada para minimizar los esfuerzos de corte y flexión, así como la deformación total, lo que define nuestra configuración inicial óptima.

Tabla 1: Configuración inicial y fuerzas nodales absolutas máximas.

	Nodos						
	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Fuerza [N]	9.06	9.06	20.19	20.19	11.22	1.79	1.79
Dirección [rad]	1.08	1.08	-1.48	-1.48	-1.46	-0.84	-0.84
θ_1 [rad]	-5.54	3.01	1.67	1.38	1.24	2.3	1.39
θ_2 [rad]	-5.54	-5.54	-4.44	-4.44	-4.44	-4.44	-4.44

Los resultados obtenidos permiten identificar la configuración inicial óptima que minimiza las tensiones críticas y maximiza la eficiencia del diseño, que se corresponden con la orientación de las fuerzas máximas, presentadas en la Tabla 1.

Adicionalmente, se realizan modificaciones estructurales en los componentes rígidos del mecanismo. Estas incluyen la introducción de filetes para reducir las concentraciones de tensión en las piezas críticas y el refuerzo de ciertos elementos clave, como la unión entre la junta flexible θ_6 y los sólidos correspondientes a los enlaces L_5 y L_6 . Estas mejoras evitan discontinuidades geométricas en el diseño y permiten una distribución más uniforme de las cargas garantizando la estabilidad estructural del sistema bajo las condiciones de operación más exigentes.

Con las dimensiones totales del mecanismo y las formulaciones presentadas, se procedió a elaborar un primer diseño de la pata caminadora utilizando el programa CAD de Solidworks (Figura 7).

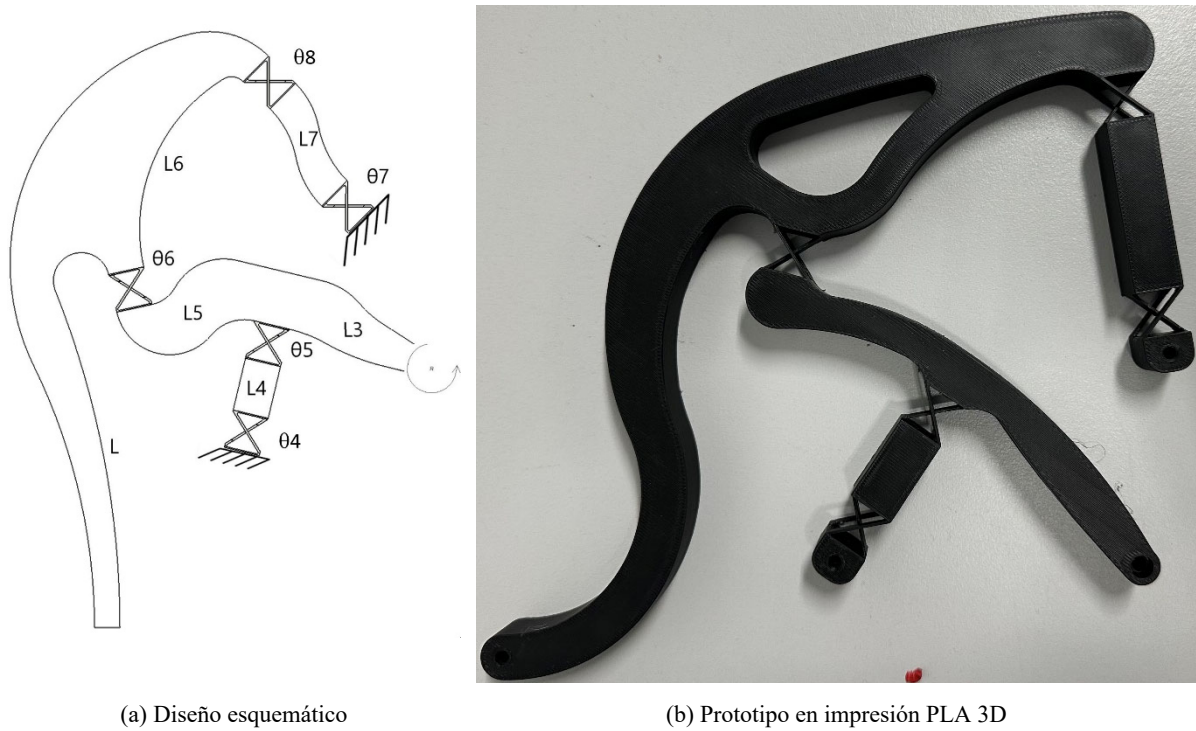


Figura 7: Pata caminadora flexible.

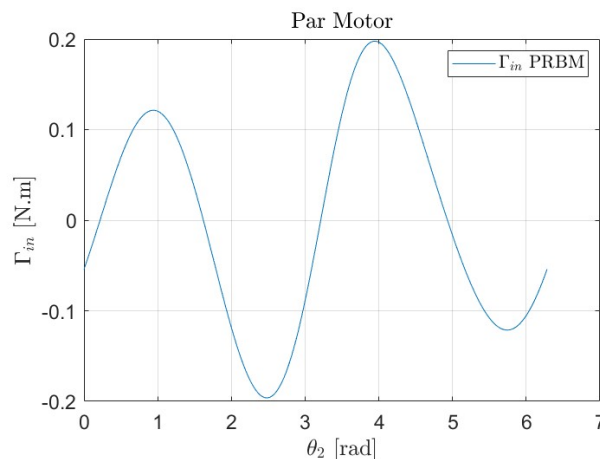
3. Resultados

3.1. Par motor, fuerzas y momentos nodales

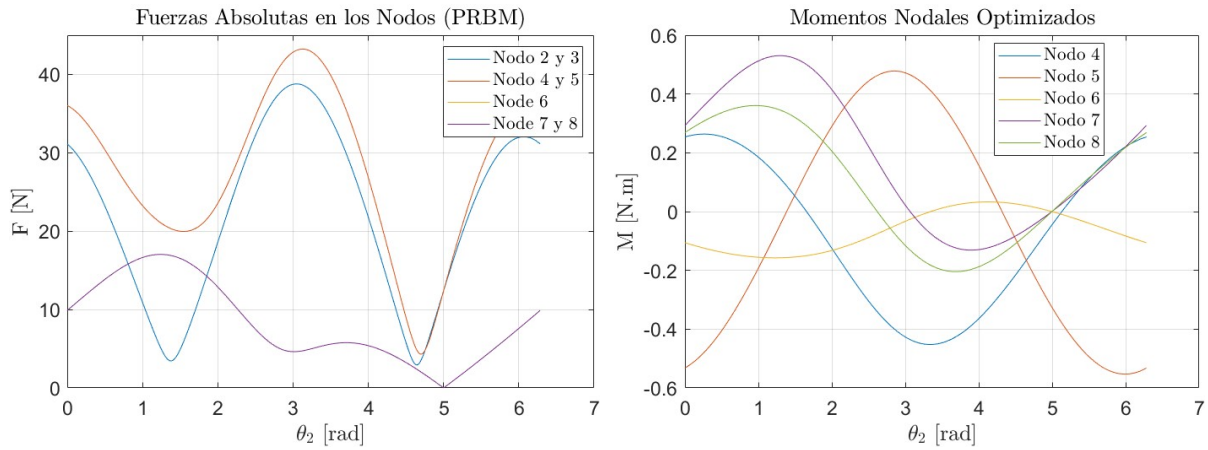
Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico permitieron evaluar el comportamiento dinámico del mecanismo. En la Figura 8a se presenta la evolución del par motor necesario para accionar el mecanismo en función del ángulo de entrada. Se observa que la curva presenta variaciones no lineales, lo que indica la influencia de la configuración cinemática en la transmisión del movimiento. Un análisis detallado de la figura permite identificar los puntos críticos donde el par requerido alcanza valores máximos, lo cual es fundamental para la selección del actuador.

En la Figura 8b se presentan las fuerzas absolutas calculadas en cada articulación. Se evidencia que las articulaciones ubicadas en la base del mecanismo soportan las mayores cargas, mientras que las uniones flexibles presentan esfuerzos menores. Esta información es clave para optimizar el diseño, garantizando que las juntas flexibles sean capaces de soportar las cargas sin comprometer la durabilidad del sistema.

Finalmente, en la Figura 8c se muestran los momentos absolutos en las uniones flexibles que sustituyen a las articulaciones. El análisis de estos resultados permite identificar las regiones del mecanismo que experimentan mayores momentos flectores, lo que resulta crucial para la selección del material y el diseño estructural de las uniones flexibles.



(a) Par motor de entrada



(b) Fuerzas nodales absolutas

(c) Momentos nodales absolutos

Figura 8: Resultados del modelo numérico.

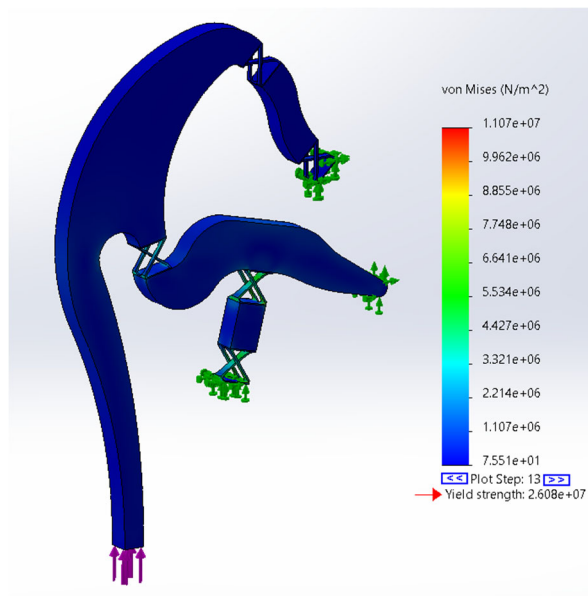
3.2. Deformación-carga y tensiones máximas

El modelo se verificó mediante simulaciones de elementos finitos (FEM) en SolidWorks, analizando la distribución de tensiones y la relación fuerza-deformación. Se definieron condiciones de contorno representativas de la operación del mecanismo, aplicando una carga de 1 kg en la punta del eslabón terminal. Se empleó ácido poliláctico (PLA) como material de referencia, con propiedades mecánicas obtenidas de literatura técnica [12].

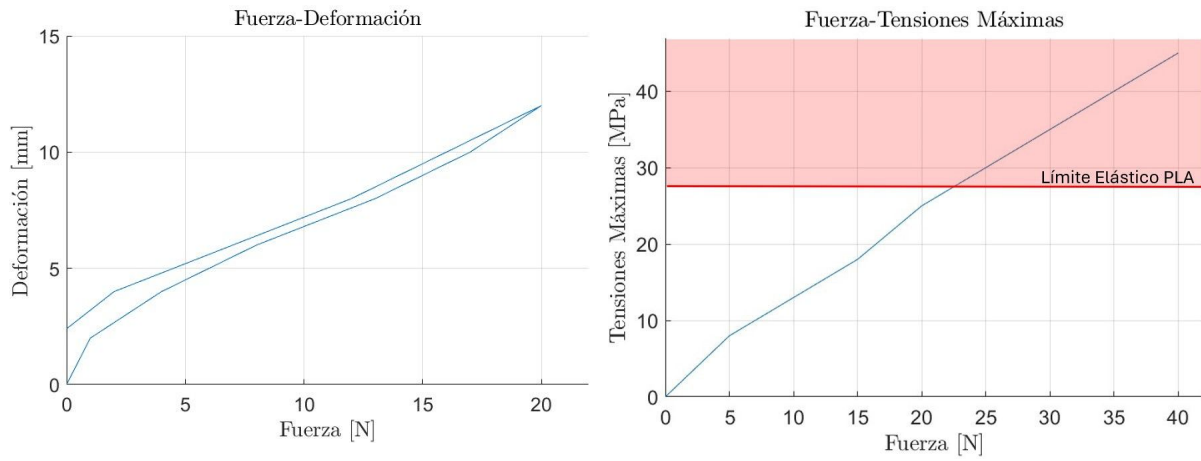
La Figura 9a muestra la distribución de tensiones de von Mises en el mecanismo, permitiendo identificar las regiones con concentraciones de esfuerzos críticos. Se observa que las tensiones máximas se localizan en las articulaciones flexibles, lo que confirma la importancia del diseño de estas uniones para evitar fallos estructurales.

En la Figura 9b se presenta la relación fuerza-deformación obtenida de las simulaciones. Se verifica un comportamiento lineal dentro del rango de operación previsto, lo que sugiere que el mecanismo se comporta de manera predecible bajo carga. La deflexión máxima alcanzada es de 14 mm con una carga máxima de 22.4 N antes de llegar al límite elástico del material, dando una capacidad de carga mayor que 10:1 como se requería y confirmando la viabilidad del diseño para aplicaciones robóticas ligeras.

En la Figura 9c se grafican las tensiones de von Mises máximas en función de la carga aplicada. Este análisis es clave para determinar los límites de operación del mecanismo, asegurando que el material utilizado no supere su resistencia a la fluencia bajo condiciones normales de funcionamiento.



(a) Tensiones de von Mises



(b) Gráfica fuerza-deformación

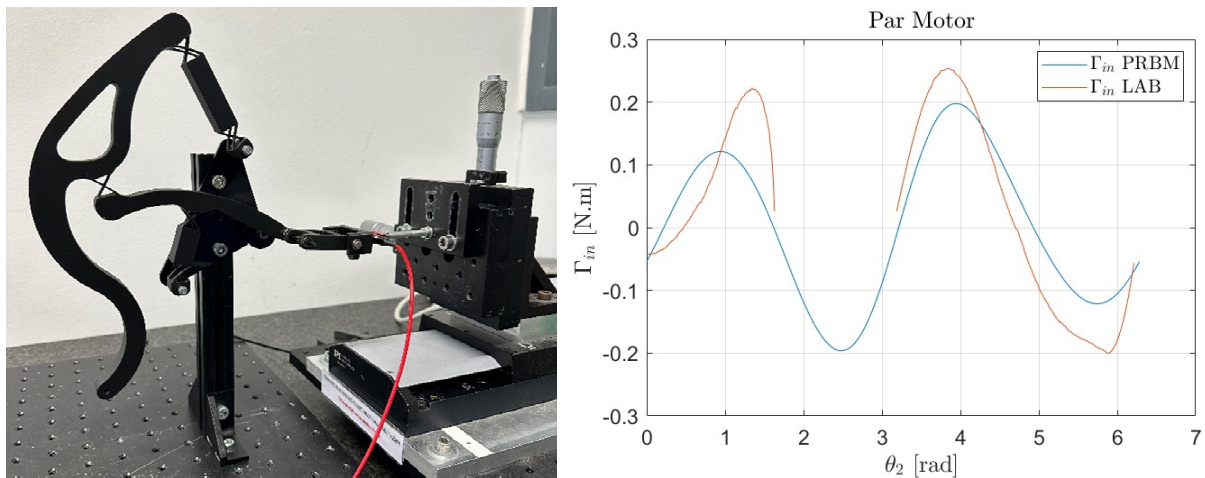
(c) Gráfica de tensiones de von Mises máximas

Figura 9: Resultados de la simulación con FEM.

3.3. Mediciones en laboratorio

Para validar los resultados numéricos, se realizaron pruebas experimentales en laboratorio utilizando un prototipo impreso en 3D en PLA. La Figura 10a muestra el montaje experimental utilizado para medir el par motor requerido en diferentes configuraciones del mecanismo. El mecanismo fue sometido a carga utilizando un motor lineal PI M505.4DG con una precisión de 1 μm por 25 mm de recorrido. Se conectó una celda de carga Futek (FSH00104) entre el prototipo y el motor lineal para medir la fuerza de actuación y garantizar que el mecanismo estuviera sin tensiones en su configuración inicial. La conexión entre la pieza de prueba, la celda de carga y el motor se realizó con dos piezas de varilla roscada M3. Un conjunto de tuercas se apretó contra el prototipo y el motor para evitar cualquier juego en el montaje. Se prestó especial atención a la alineación del escenario lineal y el conector para garantizar que el mecanismo permaneciera completamente soportado durante la prueba. Se utilizaron un conjunto de tubos y accesorios de Thorlabs para conectar el otro extremo del prototipo a la mesa de soporte debajo de la placa.

En la Figura 10b se presentan las mediciones de par motor obtenidas en el laboratorio, comparadas con los resultados del modelo numérico, observándose una buena correlación entre ambos, con diferencias atribuibles a efectos de fricción y tolerancias de fabricación. Aun así, se observa una tendencia similar a la predicha por el modelo, lo que confirma la validez del enfoque teórico utilizado en el diseño del mecanismo. La ausencia de datos del test del laboratorio entre 1.8 y 3.1 radianes se atribuye a la limitación del montaje experimental ya que contiene configuraciones de frontera, las cuales aumentan su dominio con la deformación y el juego de las piezas del montaje. El par no se midió directamente, sino que se midió la fuerza lineal aplicada a un mecanismo de biela-manivela. Es por esta razón que, en ese rango, no se encontraron valores reales.



(a) Montaje experimental montado

(b) Comparación del par motor obtenido y modelado

Figura 10: Resultados de par motor en laboratorio.

4. Discusión y Conclusiones

El desarrollo de mecanismos flexibles ha demostrado ser una alternativa viable a los sistemas tradicionales basados en sólidos rígidos, especialmente en aplicaciones donde la reducción de peso, la simplicidad estructural y la eficiencia energética son factores clave. En este trabajo, se diseñó, modeló y validó un mecanismo flexible que actúa como pata caminadora, integrando principios de flexión controlada para reducir la dependencia de articulaciones mecánicas convencionales.

Los resultados obtenidos a través de simulaciones numéricas y pruebas experimentales confirman que el diseño propuesto cumple con los requisitos funcionales establecidos, permitiendo una locomoción estable sin la necesidad de sistemas de control avanzados. La aplicación del modelo de cuerpo pseudo-rígido (PRBM) junto con la optimización estructural permitió estimar con precisión las propiedades mecánicas de las uniones flexibles y su impacto en la dinámica del mecanismo.

Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones en el diseño y modelado del sistema:

- Modelado de las uniones flexibles: aunque el PRBM ofrece una aproximación efectiva, no considera efectos como la histéresis o la fatiga del material a largo plazo, lo que podría afectar el rendimiento en aplicaciones reales.
- Propiedades del material: la fabricación del prototipo en PLA mediante impresión 3D introduce anisotropías y variaciones en la rigidez estructural. El uso de materiales avanzados, como polímeros reforzados o aleaciones con memoria de forma, podría mejorar la durabilidad y respuesta del mecanismo.
- Par motor y eficiencia energética: aunque el diseño minimiza la necesidad de actuadores adicionales, el comportamiento dinámico del mecanismo presenta variaciones en el par requerido en función de la fase de marcha, lo que sugiere la necesidad de un análisis más detallado para optimizar su desempeño energético.

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos validan la viabilidad del mecanismo flexible como alternativa eficiente y económica para sistemas de locomoción robótica. Futuras investigaciones podrán enfocarse en la integración de sensores embebidos para evaluar el comportamiento real del mecanismo en distintos entornos, así como en la implementación de materiales inteligentes que permitan una adaptación activa a diferentes condiciones de carga y terreno.

En conclusión, este trabajo establece una base sólida para la aplicación de mecanismos flexibles en la robótica caminadora, abriendo nuevas posibilidades en el desarrollo de robots de exploración, asistencia y rescate en entornos impredecibles.

5. Referencias

- [1] Howell L.L., *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, New York, NY (2002)
- [2] Howell, L. L. "Compliant mechanisms", *21st century kinematics: The 2012 NSF Workshop*. London: Springer London, UK (2013)
- [3] Patnaik L., Umanand L., "Kinematics and dynamics of Jansen leg mechanism: A bond graph approach", *Simulation Modelling Practice and Theory* **60**, 160–169 (2016)
- [4] Shah, R., Shah, D., Panchal, N., Bhavsar, K., Parmar, U., & Bhatt, P.. "A comparative study of kinematic analysis between conventional Theo Jansen mechanism and modified Theo Jansen mechanism developed using ABS for the development of spyder robot" *Materials Today: Proceedings*, 72(3) (2023)
- [5] Herzog L., Weschler L., *Strandbeest: The Dream Machines of Theo Jansen*, Taschen, Köln, Alemania, (2014)
- [6] Ghassaei A., "The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism" Tesis de licenciatura, Departamento de Física y Astronomía, Pomona College, Claremont, CA, (2011)
- [7] Klann J.C., "Walking Device", Patente de EE. UU. N.º 6,260,862, (17 de julio de 2001).
- [8] Mahendran, K., Zhi, H.L., Yazid, M.R., Othman, W.A.F.W., Wahab, A.A.A., Alhady, S.S.N.. "Development of Four-Legged Klann Linkage Walking Robot". *Proceedings of the 11th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 829, Springer, Singapore (2022)
- [9] Selvi O., Cindioglu C., Kemal Ider S., Ceccarelli M.. "Kinematic design and analysis of a novel overconstraint walking mechanism". *Robotica*, First View, pp. 1 – 21 (2025)
- [10] Lusk C., "Using Pseudo-Rigid Body Models", *Handbook of Compliant Mechanisms*, Edited by Howell L.L., Magleby S.P., Olsen B.M., pp. 55-76, John Wiley & Sons, New York, NY (2013).

- [11] Farhadi D., Tolou N., Herder J.L., “A Review on Compliant Joints and Rigid-Body Constant Velocity Universal Joints Toward the Design of Compliant Homokinetic Couplings”, *Journal of Mechanical Design* **137**(3), 032301 (2015)
- [12] Auras R., Lim L.T., Selke, S.E., Tsuji, H. (Eds.). *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (2010)