

Robot modular blando basado en origami para tareas de *pick-and-place*

Mena, L.*, Lipa, G., Rodriguez-Sanz, A., Muñoz, J., Monje, C. A.

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y la validación experimental de un robot modular blando basado en estructuras de origami, implementado como una cadena de módulos de Kresling accionados mediante un sistema de tendón. Para el control del sistema se emplea una arquitectura jerárquica previamente desarrollada, basada en controladores de orden fraccionario con compensación anti-windup. La validez del enfoque propuesto se demuestra experimentalmente mediante la aplicación del sistema a una tarea de manipulación tipo *pick-and-place*, mostrando un comportamiento estable en una cadena modular blanda de múltiples módulos. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del uso del origami como estructuras flexibles y modulares para aplicaciones de manipulación robótica.

Palabras clave: Estructuras inteligentes, Sistemas fraccionales, Modelado, Aplicaciones de control robusto.

Modular Soft Origami Robot for Pick-and-Place Tasks

Abstract

This work presents the design and experimental validation of a modular soft robot based on origami structures, implemented as a chain of Kresling modules actuated through a tendon-driven mechanism. A previously developed hierarchical control architecture based on fractional-order controllers with anti-windup compensation is employed to govern the system. The proposed approach is experimentally validated through its application to a pick-and-place manipulation task, demonstrating stable behavior in a modular chain composed of multiple soft origami modules. The results confirm the feasibility of using modular soft origami structures for robotic manipulation applications.

Keywords: Smart structures, Fractional systems, Modeling, Robust control applications.

1. Introducción

Los robots modulares constituyen una aproximación de diseño en la que un sistema robótico se construye a partir de unidades discretas (módulos) que pueden conectarse entre sí para formar estructuras con distintas morfologías y funcionalidades. Este paradigma persigue incrementar la adaptabilidad y la reutilización del hardware, permitiendo que un mismo conjunto de componentes se reconfigure para responder a requisitos de tareas y de entorno cambiantes Seo et al. (2019). Entre los desarrollos tempranos que impulsaron este campo se encuentran los sistemas celulares tipo Cellular Robotics (CEBOT), orientados a la autoorganización y cooperación entre unidades, así como propuestas de manipuladores reconfigurables como el Reconfigurable Modular Manipulator System (RMMS), concebido pa-

ra superar las limitaciones inherentes a configuraciones fijas en brazos robóticos Fukuda and Kawachi (1992); Schmitz et al. (2018).

Desde una perspectiva de alto nivel, la investigación en robótica modular aborda de forma integrada la definición de los módulos, los mecanismos de interconexión, la coordinación distribuida y la planificación de movimiento. En el caso de sistemas autorreconfigurables, este enfoque se extiende además a los algoritmos que permiten modificar dinámicamente la conectividad y, por tanto, la morfología del robot. En este contexto, los robots modulares autorreconfigurables se han identificado como una línea estratégica por su potencial para lograr sistemas más versátiles y robustos, capaces de adaptarse a nuevas misiones o de recuperarse ante fallos mediante reconfiguración

*Autor para correspondencia: lmena@pa.uc3m.es

física (Yim et al. (2007); Christensen et al. (2013)).

La modularidad resulta especialmente atractiva en el ámbito de la robótica blanda, donde el empleo de materiales y actuadores deformables facilita interacciones seguras y tolerantes con el entorno. Sin embargo, estas mismas características suelen dificultar la reparación o sustitución de componentes, así como la reutilización y escalabilidad de los diseños. Los robots blandos modulares (MSR, *Modular Soft Robots*) abordan estas limitaciones mediante unidades blandas intercambiables y mecanismos de unión que permiten montar, reemplazar o reconfigurar rápidamente el sistema. En función del grado de variabilidad estructural, pueden distinguirse: (i) MSR ensamblados, con disposiciones de módulos esencialmente fijas orientadas a un montaje y mantenimiento sencillos; (ii) MSR reconfigurables, que permiten cambios de configuración mediante intervención externa; y (iii) MSR autorreconfigurables, que incorporan capacidades para modificar su estructura de forma autónoma en respuesta a la tarea o al entorno Zhang et al. (2020).

Un elemento determinante en los MSR es el mecanismo de conexión entre módulos, ya que condiciona la rigidez de la unión, la repetibilidad del acoplamiento, la facilidad de desacople y el coste de integración del sistema. En la práctica, se emplean uniones mecánicas basadas, por ejemplo, en enclavamientos o geometrías complementarias, magnéticas, adhesivas o basadas en vacío, cada una de ellas con compromisos específicos entre capacidad de alineamiento, resistencia estructural, reversibilidad y complejidad. Ejemplo de ello es el robot SIMBA, propuesto por Mishra et al. (2017). Es un brazo continuo ensamblado accionado por tendones y compuesto por módulos de flexión secuenciales capaces de alcanzar 180°. Por su parte, Robertson and Paik (2017) presentan un sistema reconfigurable basado en actuadores neumáticos por vacío (V-SPA), donde la succión se utiliza tanto para la actuación como para conectar los módulos, permitiendo tareas de locomoción multimodal y manipulación. Por otro lado, Zou et al. (2018) detalla un robot omnidireccional auto-reconfigurable que, mediante una matriz de módulos con imanes integrados, puede desplazarse a 18.5 m/h, adaptarse a entornos como tuberías y es capaz de auto-ensamblarse. Finalmente, Mena et al. (2025a) introduce un mecanismo de acople distintivo basado en estructuras de origami y polímeros reversibles, utiliza enlaces covalentes activados por temperatura para crear uniones de alta resistencia entre módulos, lo que dota al robot de capacidades de reconfiguración y auto-reparación ante daños estructurales.

En conjunto, la modularidad en robótica blanda abre una vía práctica para el desarrollo de sistemas multifuncionales y adaptables, al tiempo que simplifica los procesos de fabricación, mantenimiento y evolución del diseño mediante la sustitución o recombinación de módulos. Además, este enfoque facilita la escalabilidad del sistema, ya que permite modificar el alcance, la capacidad de deformación o la funcionalidad global del robot sin necesidad de rediseñar por completo la plataforma. Esta propiedad resulta especialmente relevante en aplicaciones donde las condiciones geométricas o las restricciones del entorno pueden variar entre tareas, como ocurre en manipulación, inspección o interacción segura con objetos delicados.

En ese sentido, este trabajo propone un sistema robótico modular con unidades modulares blandas inspiradas en estructuras de origami, utilizando el patrón Kresling. Cada módulo se

concibe como un actuador ligero y flexible cuya deformación se produce mediante el plegado y desplegado de la geometría de Kresling. La disposición de los módulos genera una cadena modular de unión simple, actuada a través de un sistema de tendón controlado con algoritmos de control robusto. Este enfoque permite construir robots con un alto grado de flexibilidad, bajo peso y capacidad de adaptación, manteniendo al mismo tiempo un comportamiento cinemático definido. Asimismo, el uso de una arquitectura jerárquica de control permite abordar de forma estructurada problemas asociados a la no linealidad, la saturación del actuador y las perturbaciones derivadas de la propia deformabilidad del sistema.

Este trabajo se organiza en cinco secciones. La Sección 2 describe el diseño del prototipo de robot modular basado en origami. La Sección 3 presenta la implementación de un controlador robusto. En la Sección 4 se lleva a cabo la validación experimental de la cadena modular y la exploración de sus posibles aplicaciones. Finalmente, la Sección 5 recoge las conclusiones y plantea futuras líneas de investigación.

2. Robot modular blando basado en origami

El sistema modular que se propone en este trabajo está compuesto por módulos individuales blandos inspirados en estructuras de origami. El origami es arte ancestral de plegado de papel que transforma patrones bidimensionales en figuras o estructuras tridimensionales. El patrón elegido es Kresling, que se genera a partir de triángulos sucesivos que producen un poliedro. El triángulo principal se muestra en la Figura 1 (izquierda), la geometría está definida por $L_{AB} = a$, $L_{BC} = a \cdot \sin(\alpha) / \sin(\beta)$, $L_{AC} = a \cdot \sin(\alpha + \beta) / \sin\beta$, donde a , α y β son valores constantes. La resistencia mecánica de la estructura está determinada por los ángulos α y β , que son los principales criterios de diseño para crear el poliedro cilíndrico. Esta configuración de origami presenta un comportamiento biestable que permite obtener un módulo deformable. La posición del módulo (extendido o comprimido) está determinada por la rotación θ . Mientras la estructura se comprime, la base superior rota un ángulo θ descrito mediante (1), (2) y (3).

$$r = \frac{\frac{a}{2}}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{n} - 2a \sin\left(\frac{l_{BC} \cos\delta}{2r}\right) \quad (2)$$

$$h = l_{BC} \cdot \sin(\delta) \quad (3)$$

Cada módulo individual está compuesto por una estructura de origami blando fabricada a partir de láminas de polipropileno que permiten al módulo retomar a su posición original, gracias a su propiedad de metamaterial, sin necesidad de incluir elementos adicionales. El accionamiento del módulo se realiza mediante un mecanismo de tendón. El estado de plegado del módulo de origami está directamente relacionado con la longitud del tendón y, por tanto, con la posición del motor que lo acciona. Al unir varios módulos con una unión simple basada en tornillo-tuerca entre módulos, se obtienen cadenas modulares. Cada cadena esta accionada por un único tendón, proporcionando esta configuración dos movimientos combinados, un desplazamiento axial con una rotación intrínseca como consecuencia del patrón de plegado Kresling. La Figura 1 (derecha)

muestra una cadena modular compuesta por tres módulos origami blandos interconectados.

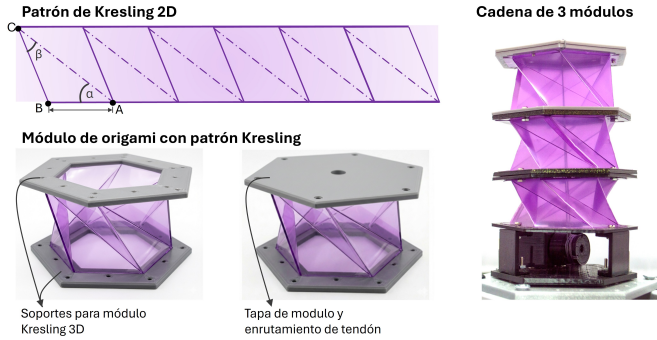


Figura 1: Materiales y componentes utilizados para la construcción del módulo de origami. Patrón Kresling bidimensional y módulo de origami ensamblado (izquierda). Cadena modular de tres módulos interconectados (derecha).

En este trabajo, el robot modular blando se implementa como una cadena formada por cuatro módulos de origami basados en polipropileno, interconectados en serie y accionados mediante un único sistema de tendón que emplea un motor de corriente continua con una relación de reducción de 210:1 y un sistema de cabrestante (polea de 7,5 mm de radio) para regular la longitud del tendón. El motor incorpora un encoder de tipo Hall integrado que registra 28 pulsos en cuadratura por cada revolución del eje, lo que proporciona una resolución de $0,06^\circ$ en el lado del engranaje para la medición de la posición. El ángulo de rotación del motor, transmitido a través de la polea, determina de forma proporcional la longitud del tendón, esta configuración permite accionar simultáneamente todos los módulos, generando un movimiento coordinado de plegado y desplegado de la cadena modular.

El extremo superior de la cadena modular está equipado con un efector final intercambiable, lo que aporta versatilidad al sistema y permite su adaptación a distintos escenarios de aplicación. En la validación experimental presentada en este artículo, dicho efector consiste en un electroimán comercial, alimentado con un voltaje de activación de 5V, seleccionado por su bajo consumo energético y facilidad de integración.

Esta configuración habilita el uso del robot modular como una herramienta blanda orientada a tareas de manipulación de tipo *pick-and-place*, especialmente adecuada para la captura, transporte y liberación controlada de objetos metálicos. La naturaleza intercambiable del efector final abre además la posibilidad de incorporar otros dispositivos en futuras implementaciones, ampliando así el rango funcional del sistema más allá de la manipulación magnética.

La Figura 2 muestra el prototipo completo del robot modular, compuesto por una cadena de cuatro módulos de origami. El sistema de actuación se basa en un mecanismo de tendón, accionado mediante un motor de corriente continua (CC) equipado con encoder para la medición precisa de la posición. En el extremo distal se integra un efector final basado en un electroimán, lo que permite la manipulación controlada de objetos metálicos durante los ensayos experimentales.

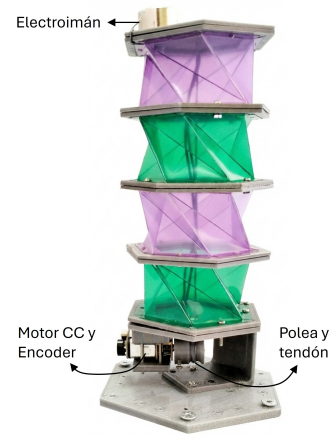


Figura 2: Prototipo del robot modular blando basado en una cadena de cuatro módulos origami, empleado como herramienta *pick-and-place*.

La modularidad del sistema permite modificar de forma directa el alcance y el desplazamiento vertical del robot mediante la adición o eliminación de módulos, manteniendo inalterados tanto el principio de actuación como la arquitectura de control. Esta característica resulta especialmente relevante para aplicaciones de manipulación, donde los requisitos geométricos pueden variar en función de la tarea o del entorno.

3. Arquitectura de control

El control del robot modular blando basado en origami se fundamenta en una arquitectura jerárquica previamente desarrollada y validada para actuadores blandos accionados por tendón en Mena et al. (2021) y Mena et al. (2025b). Dicha arquitectura está diseñada para gestionar las particularidades de este tipo de sistemas, tales como la presencia de saturación en los actuadores y la acumulación del término integral. En este trabajo, esta estrategia de control se emplea como base para garantizar un control estable y preciso del estado de plegado de los módulos origami cuando forman parte de un sistema modular reconfigurable.

El esquema de control empleado se basa en un sistema de dos lazos. Un lazo interno de velocidad regula el comportamiento dinámico del motor, mientras que un lazo externo de posición gobierna el estado de despliegue del módulo origami. Este enfoque permite desacoplar el control de bajo nivel del motor del control de alto nivel del sistema modular, facilitando su aplicación a diferentes configuraciones. El esquema general de la arquitectura de control utilizada se muestra en la Figura 3.

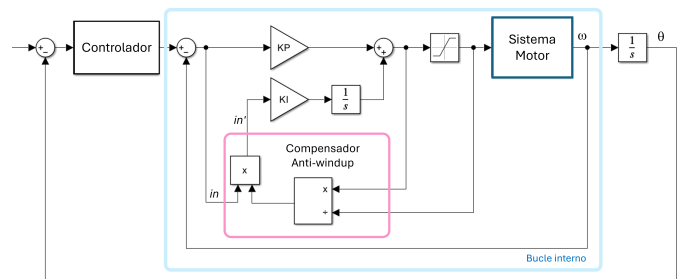


Figura 3: Esquema general de la arquitectura de control empleada, basada en un controlador fraccionario con compensación anti-windup para lazo interno de velocidad y un lazo externo de posición (Mena et al. (2025b)).

En el lazo interno de velocidad se emplea un controlador de orden fraccionario con compensación anti-windup, cuyo diseño y ajuste han sido descritos en detalle en Mena et al. (2025b).

El controlador fraccionario de tipo FOPI aplicado en el lazo interno de velocidad viene dado por la expresión mostrada en (4),

$$FOPI(s) = 323,9 + 7388,5 s^{-0,91} \quad (4)$$

El comportamiento dinámico del sistema correspondiente al lazo interno de velocidad se modela mediante una función de transferencia identificada experimentalmente a partir del sistema real. La expresión del modelo identificado se recoge en (5),

$$F_v(s) = \frac{3,75s + 1762}{s^2 + 90,93s + 1765} \quad (5)$$

Sobre este lazo interno se implementa un lazo externo de posición gobernado por un controlador fraccionario de tipo FOPD. Los parámetros de diseño del controlador se fijaron en una frecuencia de cruce $\omega_{gc} = 20 \text{ rad/s}$ y un margen de fase $\phi_m = 65^\circ$. El controlador resultante se expresa en (6).

$$FOPD(s) = 30,6069 + 0,2139 s^{1,38} \quad (6)$$

4. Validación experimental

Con el objetivo de validar el robot modular blando basado en origami, se realizaron dos pruebas experimentales empleando una cadena modular compuesta por cuatro módulos. En ambos casos se utilizó el mismo esquema de control descrito en la sección anterior, y se analizó la respuesta en posición del sistema durante la ejecución de cada prueba.

La Prueba 1 evalúa la capacidad del sistema para accionar una cadena de cuatro módulos y mantener posiciones estables durante el plegado. El ensayo consistió en comprimir la estructura hasta una consigna de 10 rad, correspondiente a un desplazamiento lineal aproximado de 75 mm, y posteriormente retornar a la posición inicial. La secuencia experimental de la Prueba 1 se muestra en la Figura 5.

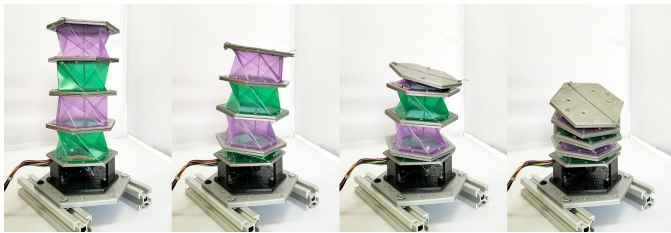


Figura 5: Secuencia experimental de la Prueba 1: compresión de una cadena modular formada por cuatro módulos origami.

La respuesta dinámica del sistema en lazo cerrado, gobernado por el controlador de orden fraccionario con compensación anti-windup, se presenta en la Figura 6. Ante una consigna de escalón, la eficacia del mecanismo anti-windup es notable al momento de alcanzar la referencia. A pesar de la saturación previa, el sistema logra desaturarse rápidamente sin exhibir el fenómeno de oscilación persistente característico de la carga integral excesiva. Aunque se registra un sobrepulso transitorio, al finalizar la rampa de subida y un subimpulso correspondiente

en la etapa de retorno ($t \approx 58 \text{ s}$), este comportamiento está considerado en el ajuste del controlador y la respuesta de posición converge al valor de consigna, anulando el error en estado estacionario ($e_{ss} \approx 0$). La evolución temporal del error de posición corrobora la robustez del esquema fraccionario, mostrando una rápida recuperación tras las discontinuidades de la referencia, mientras que la señal de control refleja un uso energético agresivo pero acotado, necesario para vencer la inercia del sistema en los cambios de dirección.

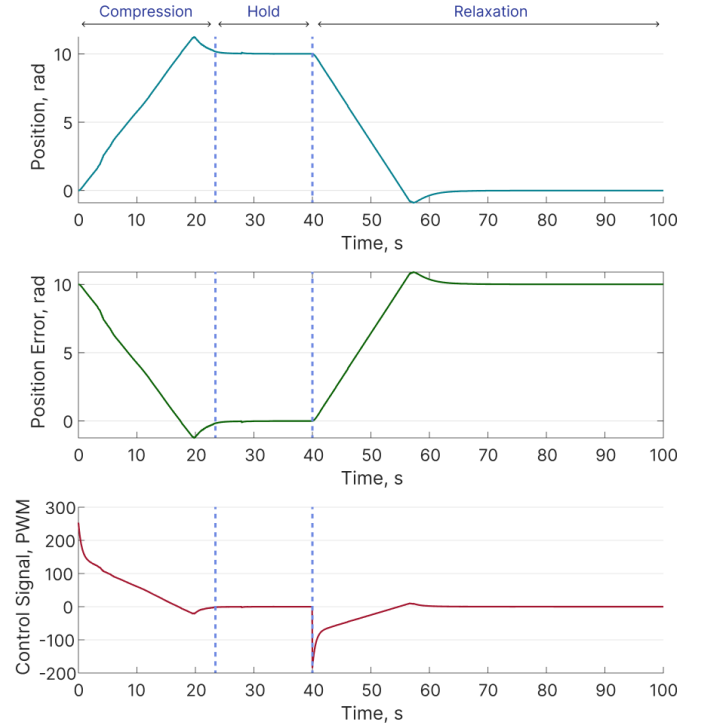


Figura 6: Respuesta experimental de la estructura de origami en la Prueba 1 ante una referencia de posición de 10 rad. Respuesta temporal en posición. (arriba). Error de posición (centro). Señal de control generada por el controlador fraccionario con compensación anti-windup (abajo).

La Prueba 2 valida el uso del robot modular como herramienta para una tarea de manipulación tipo *pick-and-place*. Para ello, el prototipo se rotó 180° y se montó sobre un raíl, incorporando un electroimán como efector final. La prueba consistió en capturar un objeto metálico (*pick*), elevarlo mediante la compresión de la cadena hasta una consigna de 5 rad, desplazar el conjunto, desplegar la cadena modular a la posición inicial y liberar posteriormente el objeto (*place*). La secuencia experimental de la Prueba 2 se muestra en la Fig.4.

La Figura 7 presenta la respuesta del sistema para una consigna de 5 rad bajo una configuración invertida, es decir, movimiento ascendente en contra de la gravedad y con carga adicional en el extremo libre. A diferencia del caso de 10 rad, la acción de control no permanece saturada, exhibiendo un pico inicial de $\approx 140 \text{ PWM}$ que decae rápidamente, lo que indica que el controlador opera mayoritariamente en su región lineal durante el transitorio de subida. Es notable la influencia de la carga gravitacional en la dinámica de retorno ($t = 80 \text{ s}$). Mientras la fase de ascenso requirió un esfuerzo continuo del actuador para vencer la rigidez de la estructura de origami y el peso

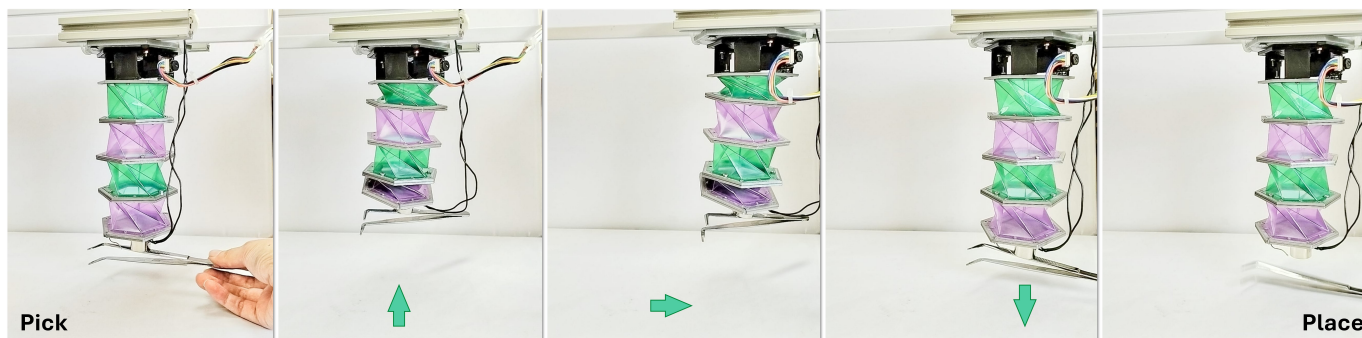


Figura 4: Prueba 2, tarea de manipulación tipo *pick-and-place*. Secuencia de la tarea (izquierda a derecha): Activación del electroimán y captura de objeto metálico (*pick*). Compresión del actuador hasta la referencia de 5 rad. Fase de mantenimiento y transporte de la carga. Despliegue y desactivación del efector final para liberar el objeto (*place*).

suspendido, la fase de descenso se ve asistida por la gravedad. Esta asimetría física resulta beneficiosa para la estabilidad final, y se evidencia que el sistema regresa a la posición de reposo con una respuesta críticamente amortiguada, eliminando casi por completo el subimpulso observado en la prueba anterior. El controlador fraccionario compensa eficazmente estas dinámicas no lineales, manteniendo un error nulo en estado estacionario durante la fase de retención ($10 < t < 80$ s) a pesar del par constante ejercido por la masa suspendida.

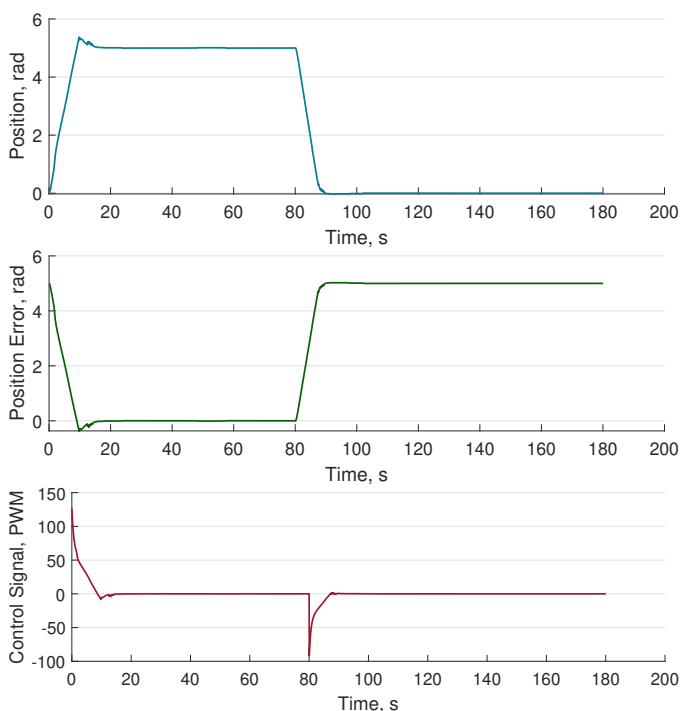


Figura 7: Respuesta en posición durante la Prueba 2 (*pick-and-place*), ante un escalón de 5 rad con el sistema en configuración invertida y carga en el extremo. Respuesta temporal en posición (arriba). Error de posición (centro). Señal de control generada por el controlador fraccionario con compensación anti-windup (abajo).

En conjunto, estas dos pruebas validan la capacidad del sistema para accionar una cadena modular de cuatro módulos y mantener posiciones estables durante intervalos prolongados, así como su aplicabilidad a una tarea de manipulación tipo *pick-and-place* en la configuración experimental descrita.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado y validado experimentalmente un robot modular blando basado en estructuras de origami, implementado como una cadena de cuatro módulos Kresling accionados mediante un único sistema de tendón y un único motor de corriente continua. Esta configuración permite accionar de forma conjunta todos los módulos de la cadena, generando un movimiento coordinado de plegado y desplegado del sistema completo.

La validación experimental se ha realizado mediante dos pruebas definidas. En la primera, se ha demostrado que el sistema es capaz de accionar una cadena modular de cuatro módulos hasta consignas de 10 rad, equivalentes a un desplazamiento lineal aproximado de 75 mm, y mantener dicha posición de forma estable durante intervalos prolongados. En la segunda, el robot modular se ha empleado como herramienta blanda para una tarea de manipulación tipo *pick-and-place*, incorporando un electroimán como efector final y manteniendo la posición requerida durante la ejecución de la tarea.

En cuanto al sistema de control, los resultados experimentales validan la robustez del esquema de control fraccionario propuesto. Durante la Prueba 1, se demostró la eficacia del mecanismo anti-windup para mitigar los efectos desestabilizadores de la saturación del actuador. Y durante la Prueba 2, con el escenario invertido se evidenció la capacidad del sistema para compensar dinámicas asimétricas y cargas gravitacionales externas. En ambos casos, el controlador garantizó la estabilidad global y la anulación del error en estado estacionario.

Por lo tanto, se concluye que la arquitectura de control empleada permite gobernar de forma estable una cadena modular de origami accionada por un único actuador, tanto en configuraciones de carga propias del accionamiento de la cadena, como durante una aplicación funcional de manipulación. Asimismo, la modularidad del sistema permite modificar el alcance y el desplazamiento del robot mediante la adición o eliminación de módulos, sin necesidad de realizar cambios en el esquema de control ni en el principio de actuación.

Se propone como trabajos futuros varias líneas de acción. En cuanto al diseño, se plantea el uso de uniones magnéticas entre módulos, para simplificar los anclajes mecánicos y permitir expandir la cadena modular de forma sencilla. Por otro lado, la integración de sensores de medida de longitud y rotación

de la cadena modular, que permitan cerrar el lazo de control a través de estas variables.

Agradecimientos

Estos resultados de investigación se enmarcan dentro de los proyectos: Proyecto ADAPTA, con referencia PLEC2023-010218, financiado por MICIU-AEI-10.13039-501100011033. Proyecto AdaptiveFold del programa de Ayudas para la Actividad Investigadora de los Jóvenes Doctores del Programa Propio de Investigación de la UC3M, con referencia 2025/00832/001, concedido por la Universidad Carlos III de Madrid. Proyecto del programa de Ayudas para la Actividad Investigadora de los Jóvenes Doctores del Programa Propio de Investigación de la UC3M, con referencia 2025/00764/001, concedido por la Universidad Carlos III de Madrid. Y el programa de actividades de I+D con referencia TEC-2024/TEC-62 y acrónimo iRoboCity2030-CM, concedido por la Comunidad de Madrid a través de la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica a través de la Orden 5696/2024.

Referencias

Christensen, D. J., Schultz, U. P., Stoy, K., 2013. A distributed and morphology-independent strategy for adaptive locomotion in self-reconfigurable modular robots. *Robotics and Autonomous Systems* 61 (9), 1021–1035.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.05.009>

Fukuda, T., Kawauchi, Y., 1992. Concept of cellular robotic system (cebot) and basic strategies for its realization. *Computers & Industrial Engineering*.
DOI: 10.1016/0360-8352(92)90029-D

Mena, L., Muñoz, J., Monje, C. A., Balaguer, C., 2021. Modular and self-scalable origami robot: A first approach. *Mathematics* 9 (12).
DOI: 10.3390/math9121324

Mena, L., Terryn, S., Vanderborght, B., Monje, C. A., 2025a. Reconfigurable modular soft actuator using origami structures with self-healing materials: Several technological opportunities for robotic applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2–13.
DOI: 10.1109/MRA.2025.3533386

Mena, L. K., Muñoz, J., Martínez, S., Monje, C. A., 2025b. Control de orden fraccionario aplicado a un eslabón blando basado en origami. *Simposios del Comité Español de Automática (CEA) 1* (1).
DOI: <https://doi.org/10.64117/simposioscea.v1i1.31>

Mishra, A. K., Del Dottore, E., Sadeghi, A., Mondini, A., Mazzolai, B., 2017. SIMBA: Tendon-driven modular continuum arm with soft reconfigurable gripper. *Frontiers in Robotics and AI* 4, 4.
DOI: 10.3389/frobt.2017.00004

Robertson, M. A., Paik, J., 2017. New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse capabilities. *Science Robotics* 2 (9), eaan6357.
DOI: 10.1126/scirobotics.aan6357

Schmitz, D., Khosla, P., Kanade, T., 6 2018. The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System.
DOI: 10.1184/R1/6626075.v1

Seo, J., Paik, J., Yim, M., 2019. Modular reconfigurable robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 2 (Volume 2, 2019), 63–88.
DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834>

Yim, M., Shen, W.-m., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E., Chirikjian, G. S., 2007. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics Automation Magazine* 14 (1), 43–52.
DOI: 10.1109/MRA.2007.339623

Zhang, C., Zhu, P., Lin, Y., Jiao, Z., Zou, J., 2020. Modular soft robotics: Modular units, connection mechanisms, and applications. *Advanced Intelligent Systems* 2 (6), 1900166.
DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.201900166>

Zou, J., Lin, Y., Ji, C., Yang, H., 2018. A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion. *Soft Robotics* 5 (2), 164–174.
DOI: 10.1089/soro.2017.0008