

## Control de orden fraccionario aplicado a un eslabón blando basado en origami

Mena, L. \*, Muñoz, J., Martínez, S., 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 desarrollo de un controlador robusto para un prototipo de robot blando basado en origami, actuado mediante un sistema de tendón y un motor de corriente continua de bajo coste. Debido a la limitada calidad de este tipo de actuadores, se requiere una estrategia de control capaz de mitigar los problemas de saturación y ruido. En este trabajo, se proponen un controlador robusto de orden fraccionario y un algoritmo anti-windup, obteniendo unos resultados muy competitivos, comparables a cualquier sistema de mayor precisión. Se diseñan dos controladores: uno de orden entero y otro de orden fraccionario, que se optimizan mediante métodos de ajuste en la frecuencia y la respuesta en el tiempo. Los resultados de las simulaciones y pruebas experimentales muestran que el controlador fraccionario con anti-windup mejora significativamente la robustez y el rendimiento del sistema, especialmente frente a perturbaciones externas y variaciones en las cargas.

*Palabras clave:* Robótica blanda, Control robusto, Control fraccionario, Estructuras de origami.

### Fractional order control applied to a soft link based on origami structures

#### Abstract

This paper presents the development of a robust controller for an origami-based soft robot prototype, actuated by a tendon with a low-cost DC motor. A fractional order controller is proposed to address the saturation effects of the actuator, for which an anti-windup strategy is implemented to mitigate integrator accumulation. The design of the controller involves two distinct models: an integer order and a fractional order controller. These controllers are optimised through the implementation of frequency and time response tuning methodologies. The simulation and experimental test results demonstrate that the fractional controller with anti-windup enhances the robustness and performance of the system, especially against external disturbances and load variations.

*Keywords:* Soft robotics, Robust control, Fractional order control, Origami structures.

### 1. Introducción

El origami es una técnica de plegado de papel que actualmente se está implementando en soluciones innovadoras para aplicaciones como manipulación y agarre Firouzeh and Paik (2017), biomédica Kuribayashi et al. (2006), aplicaciones espaciales Zirbel et al. (2013); Koryo (1985), medicina Mandberg et al. (2020), energía y comunicaciones Njogu et al. (2020) o robótica Zhakypov and Paik (2018); Belke and Paik (2017). Los robots de origami son económicos y fáciles de fabricar en comparación con los robots tradicionales. Su diseño optimizado elimina la necesidad de sistemas de engranajes complejos, lo que los hace ligeros. Son altamente plegables y eficientes en el uso de espacio, lo que facilita el transporte y almacenamien-

to. Además, la técnica de origami ofrece estructuras flexibles y escalables.

Los robots basados en origami se construyen a partir de láminas planas que se pliegan mediante patrones de unión predefinidos, generando estructuras tridimensionales complejas a partir de una base bidimensional. Estos patrones se entienden como módulos naturales que, al combinarse, brindan la capacidad de adaptarse a una variedad de tareas y entornos.

El proceso de transformar una estructura basada en el origami en una aplicación útil comienza con la selección del patrón. Los patrones más utilizados son Miura-ori, Flasher, Waterbomb, Yoshimura y Kresling. Los patrones Miura-ori y Flasher tienen una geometría de plegado que les permite expandirse a lo

largo de una superficie, y se utilizan comúnmente en el diseño de paneles solares para aplicaciones espaciales Yogesh et al. (2021). Estos patrones no producen una estructura en forma de eslabón y, por lo tanto, no se consideran adecuados para este estudio. Por otro lado, los patrones Waterbomb, Yoshimura y Kresling tienen una geometría de plegado que genera estructuras cilíndricas, con mayor potencial de aplicación como articulaciones robóticas basadas en eslabones.

Los movimientos primarios en la naturaleza son: flexión, torsión y contracción/extensión. En robótica, imitar el movimiento natural es un desafío. Las estructuras plegables basadas en origami incluyen desplazamientos intrínsecos de contracción/extensión en los patrones más populares para robótica, como Muira-ori, Yoshimura, Flasher o Kresling Meloni et al. (2021). Sin embargo, Kresling presenta un grado adicional de movimiento, que incluye torsión. Esta propiedad mejora la estructura de origami al introducir un comportamiento bi-estable, exclusivo de este patrón. Por tanto, se propone el uso del patrón de Kresling como eslabón blando. Este patrón está compuesto por triángulos sucesivos que al crear la estructura tridimensional generan un cilindro poliédrico (ver Figura 1). La propiedad de bi-estabilidad de este patrón permite que el eslabón sea estable tanto en el estado plegado como desplegado (máxima altura  $h$  alcanzada). La posición del eslabón se determina por la rotación en  $\theta$ . Mientras la estructura se pliega, la base superior del eslabón gira un ángulo  $\theta$  en sentido horario, como se muestra en la Figura 1(b).

Este patrón ha sido utilizado por los autores en trabajos anteriores. En Mena et al. (2021) se propone un prototipo basado en componentes mecánicos combinando partes rígidas y blandas, donde se aborda el diseño y el control. Una siguiente versión se presenta en Mena et al. (2023), con un prototipo completamente blando basado en láminas de polipropileno. En él se aborda el comportamiento bi-estable del eslabón, medido a través de un sensor inercial. En estas dos propuestas el eslabón es actuado por un sistema de tendón, conectado a un motor de corriente continua. Por otro lado, en Mena et al. (2025) se presenta un prototipo basado en materiales con propiedades de auto-reparación y curado, con actuación neumática.

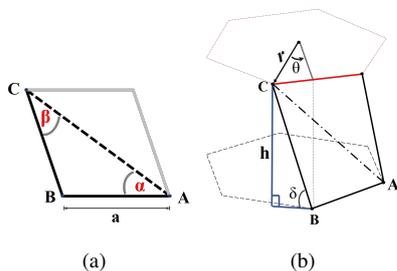


Figura 1: Patrón de Kresling. (a) Triángulo principal del patrón de Kresling en 2D. (b) Comportamiento biestable del poliedro 3D.

Los prototipos actuados con el sistema de tendón utilizan un motor de corriente continua de bajo coste, el cual presenta limitaciones como zona muerta y saturación. En el estudio realizado en Mena et al. (2021), se aborda la zona muerta mediante la implementación de un controlador en cascada que incluye un bucle interno de velocidad y un bucle externo de posición. El bucle interno se controla utilizando tanto controladores enteros

como fraccionarios, mientras que el bucle externo se limita a un control proporcional.

En este contexto, el presente trabajo propone la implementación de un sistema de control robusto basado en controladores fraccionarios, con el objetivo de mitigar los efectos de la saturación y ajustar el controlador para el prototipo fabricado en polipropileno.

El documento se organiza de la siguiente manera. El estudio y la propuesta para abordar tanto la saturación como el ajuste adecuado del controlador se presentan en la Sección 2. La Sección 3 aborda el diseño, ajuste e implementación de los controladores propuestos, así como los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y los trabajos futuros se resumen en la Sección 4.

## 2. Diseño y ajuste del controlador

La Figura 2 presenta el prototipo de eslabón blando basado en origami, sobre el cual se desarrollará e implementará el sistema de control robusto propuesto en este trabajo.



Figura 2: Prototipo de eslabón blando basado en origami, construido con polipropileno.

Se trata de una estructura de origami construida con polipropileno translúcido siguiendo el patrón Kresling con  $a = 30$  mm,  $\beta = 30^\circ$  y  $\alpha = 38^\circ$ , con seis caras  $n = 6$ , como se describe en Mena et al. (2021). El prototipo es actuado mediante un mecanismo impulsado por tendón. El tendón está conectado a la plataforma superior y es capaz de plegar el origami en diferentes posiciones lineales dependiendo de la longitud del mismo. Se utiliza un micro-motor de corriente continua con relación de engranaje 210:1 y un mecanismo de cabrestante (polea de radio 7,5 mm) para ajustar la longitud del tendón. El motor tiene un codificador hall embebido, que cuenta 28 pulsos de cuadratura por revolución del motor, proporcionando una resolución de 0,06 grados en el lado del engranaje para la medición de la posición. El ángulo de giro del motor, transmitido a través de la polea, determina la longitud del tendón de forma proporcional, por tanto, es necesario un control preciso en posición.

El esquema de control de posición basado en Mena et al. (2021) diseña un sistema de control de dos niveles: un bucle interno en velocidad, que resuelve los problemas de zona muerta del motor, y un bucle externo de control de posición, dando como resultado un sistema de actuación de servomotor.

A pesar de que el problema de la zona muerta fue resuelto mediante el uso de un bucle de control de bajo nivel, la saturación de la velocidad del motor para posiciones superiores a 0.5 rad genera un problema de acumulación en el integrador

del controlador. Este último depende del tiempo que el sistema ha estado operando bajo condiciones de saturación. Por consiguiente, el porcentaje de sobreimpulso aumenta de manera proporcional al tiempo de subida. Con el propósito de abordar el problema de saturación, se propone la implementación de una técnica anti-acumulación (anti-windup) fundamentada en el método de retroceso descrito en Tarbouriech et al. (2011). Esta estrategia anula la actualización del integrador en caso de saturación del actuador, lo que mitiga parcialmente el problema. No obstante, esta reducción se efectúa a expensas de una significativa discrepancia entre la simulación del modelo ideal (sin saturación) y el rendimiento real del sistema.

La propuesta presentada en este trabajo incluye la implementación de un algoritmo anti-windup que disminuye el valor de actualización del integrador en situaciones de saturación de la planta. Al considerar un valor reducido, equivalente a un sistema sin saturación, el valor del integrador está siempre cerca del valor simulado ideal, proporcionando un rendimiento similar, tanto para la simulación como para el sistema real. En este caso, la reducción de la entrada integral se obtiene multiplicando el valor de la entrada actual al integrador por un factor calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$in' = \frac{cS_{max}}{cS_{act}} \cdot in, \quad (1)$$

donde  $cS_{max}$  es el valor de saturación conocida del sistema real, y  $cS_{act}$  el valor actual de la señal de control.

Al calcular el factor mediante división del valor máximo de actuación (en saturación) por la señal de control actual (calculada, cuando no hay saturación), el factor solo puede tomar valores en el rango (0, 1], de manera que el resultado de esta operación, realizada en el bloque de saturación, será el factor de reducción, tal y como se aprecia en el diagrama de la Figura 3.

En consecuencia, se minimiza el valor efectivo recibido en el integrador, lo que reduce el efecto de acumulación de la saturación. La implementación del algoritmo de anti-windup se ha llevado a cabo en el bucle interno de control en velocidad para los controladores entero y fraccionario propuestos en Mena et al. (2021).

La Figura 4 muestra la diferencia en el comportamiento en posición del eslabón blando con y sin anti-windup, para cada controlador. El lazo de control externo se basa en un control

proporcional en esta primera fase de diseño.

Se evidencia un incremento en el porcentaje de sobreimpulso con el incremento de la amplitud de la consigna de posición para los controladores estándar (windup) (ver Figura 4a y Figura 4b). Por otro lado, se observa una constancia en el porcentaje de sobreimpulso para los casos con anti-windup (ver Tabla 1). Considerando el rendimiento superior del controlador fraccionario con anti-windup (ver Figura 4c), se utilizará dicho sistema de control interno para el posterior diseño del controlador externo de posición.

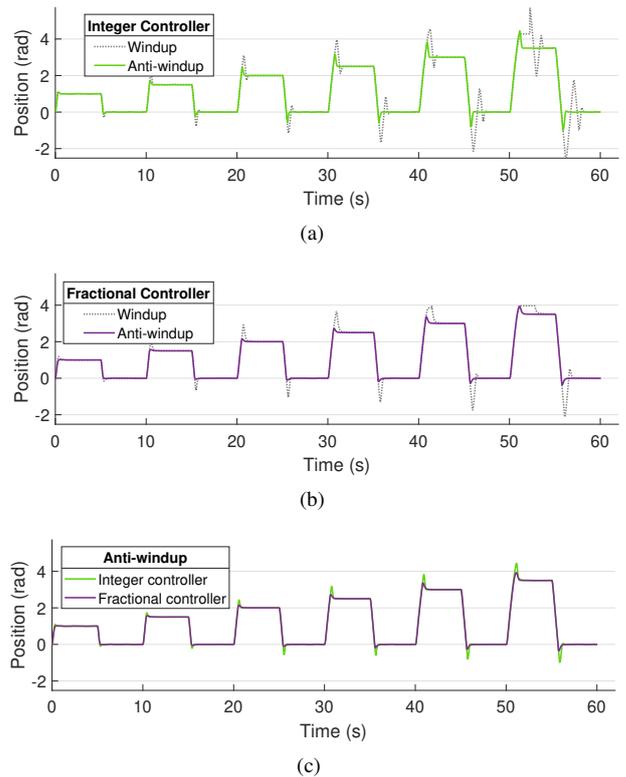


Figura 4: Respuesta del sistema en posición de la implementación del algoritmo de anti-windup en el bucle interno en velocidad. (a) Controlador entero. (b) Controlador fraccionario. (c) Comparativa entre controladores entero y fraccionario.

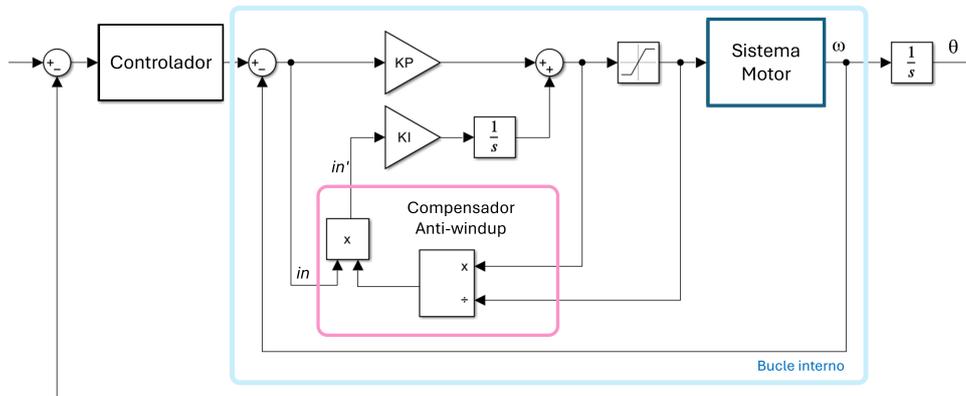


Figura 3: Diagrama de control del sistema. Detalle del compensador anti-windup implementado en el bucle interno en velocidad.

Tabla 1: Porcentaje de sobreimpulso para los controladores entero y fraccionario con y sin el algoritmo de anti-windup.

		Consigna (rad)					
		1	1.5	2	2.5	3	3.5
<b>Orden Entero</b>	Windup (Mp %)	12.5	45.1	55.1	57.9	51.8	62.7
	Anti-windup (Mp %)	0.8	15.0	21.2	26.8	27.4	26.8
<b>Orden Fraccionario</b>	Windup (Mp %)	18.0	35.2	44.7	45.6	28.2	13.3
	Anti-windup (Mp %)	0.7	4.0	7.0	8.8	12.0	12.0

Para proceder con el diseño y el ajuste del bucle de posición externo, se requiere el modelo del bucle interno. Recordemos que el bucle incluye un controlador de orden fraccionario, mostrado en la Ecuación 2, con anti-acumulación, lo que dificulta obtener un modelo directo de su función de transferencia.

$$FOPI = 323,9 + 7388,5s^{-0,91} \quad (2)$$

En este contexto, se propone la identificación del sistema por bloques de todo el sistema de bucle cerrado en velocidad con mínimos cuadrados recursivos, como se describe en Ljung and Söderström (1983).

La Ecuación 3 representa la función de transferencia del sistema obtenido por el método de identificación por mínimos cuadrados recursivos ( $F_v(s)$ ). Además, la Figura 5 muestra la respuesta en el tiempo y el diagrama de Bode del sistema resultante, tal como se observa, el comportamiento del sistema identificado es cercano al comportamiento real, por lo que se empleará para el diseño del controlador de posición.

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

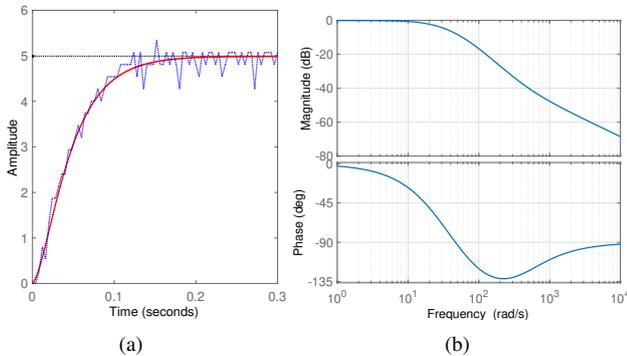


Figura 5: Sistema en lazo cerrado de velocidad con controlador de orden fraccionario y anti-windup. (a) Respuesta del sistema  $F_v(s)_{recursive}$ . (b) Diagrama de Bode del sistema  $F_v(s)_{recursive}$ .

Se ajustan a continuación dos controladores: uno de orden entero y otro de orden fraccionario, con parámetros de diseño de frecuencia de corte  $\omega_c = 20$  rad/s y margen de fase  $\phi_m = 65$  grados, con el propósito de establecer un sistema robusto. El controlador de orden entero  $IOPD$  se sintoniza como se describe en Åström et al. (2006), obteniendo las siguientes ganancias:  $kp = 23,24$ ,  $kd = 0,5585$ . El controlador resultante se muestra en la Ecuación 4. Por otro lado, se utiliza el método iso-m descrito en Muñoz et al. (2020) para obtener los parámetros del controlador PD de orden fraccionario ( $FOPD$ ):  $\alpha = 1,3800$ ,  $kp = 30,6069$ ,  $ka = 0,2139$ . La función de transferencia del controlador se muestra en la Ecuación 5.

$$IOPD = 23,24 + 0,5585s \quad (4)$$

$$FOPD = 30,6069 + 0,2139s^{1,38} \quad (5)$$

La Figura 6 muestra la respuesta en frecuencia en bucle abierto y la respuesta en el tiempo en bucle cerrado utilizando los controladores de orden entero y fraccionario. El controlador de orden entero presenta un sobreimpulso del 8% y un tiempo de establecimiento de 0,20 s, mientras que el controlador de orden fraccionario presenta un sobreimpulso del 11% y un tiempo de establecimiento de 0,27 s. Se observa que la robustez del controlador de orden entero resulta significativamente inferior en comparación con su contraparte de orden fraccionario. Este resultado concuerda con las expectativas, dado el análisis de la curva de fase del diagrama de Bode, que muestra una alta pendiente en torno a la frecuencia de cruce para el caso del controlador de orden entero (Figura 6a) y una pendiente nula (propiedad de iso-amortiguamiento (sobreimpulso constante ante cambios en la ganancia del sistema)) para el caso del controlador de orden fraccionario (Figura 6c) (véase Muñoz et al. (2020)).

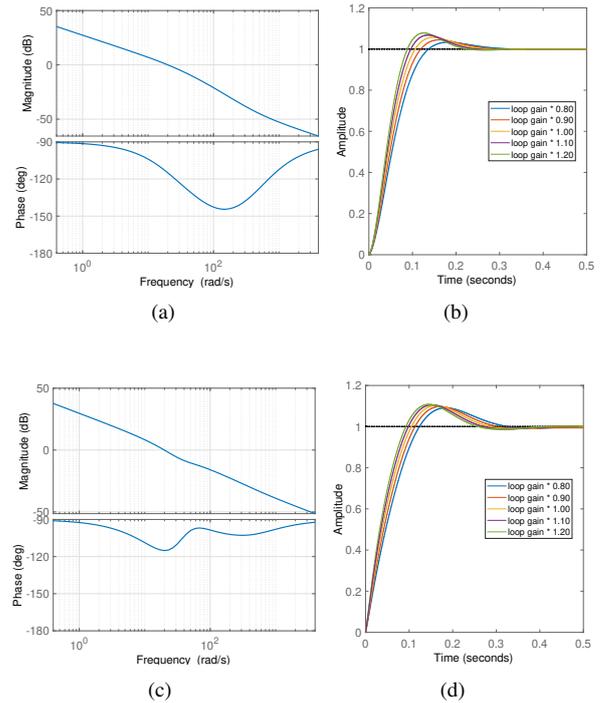


Figura 6: Controladores en posición. (a) Diagrama de Bode en bucle abierto del controlador de orden entero. (b) Respuesta temporal en bucle cerrado del controlador de orden entero. (c) Diagrama de Bode en bucle abierto del controlador de orden fraccionario. (d) Respuesta temporal en bucle cerrado del controlador de orden fraccionario.

### 3. Pruebas y resultados

La validación del comportamiento de los controladores se ha realizado mediante pruebas de posición con carga en el eslabón de origami. El uso de cargas implica perturbación y cambios en la ganancia del sistema, condiciones que pondrán a

prueba la robustez y estabilidad del sistema de control. La primera prueba consiste en una entrada escalón de 3,5 rad para plegar al eslabón 26,2 mm, con cargas de 20 gr a 110 gr. Cabe mencionar que el peso de la estructura de origami es de 14 gr. Las cargas se colocan en la parte superior de la plataforma, como se muestra en la Figura 7.

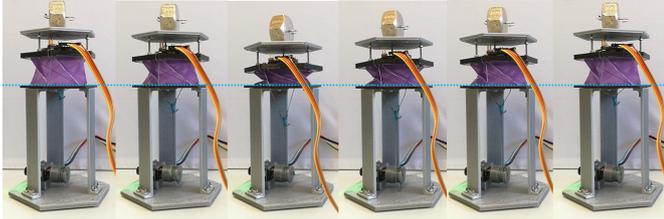


Figura 7: Funcionamiento del prototipo de eslabón blando durante la prueba de validación de los controladores con carga de 100 gr.

La Figura 8 muestra los resultados de la prueba utilizando el controlador de orden entero y la Figura 9 muestra los resultados del controlador de orden fraccionario. Las cargas generan perturbaciones en el sistema que no fueron consideradas en el diseño de los controladores. Por lo tanto, el comportamiento estable del sistema demuestra que los controladores son robustos tanto en el caso de orden entero como en el de orden fraccionario. Similar a las simulaciones, la robustez del controlador de orden fraccionario es mejor, mostrando la propiedad de isomortiguamiento (véase Monje et al. (2010)) con un sobreimpulso prácticamente invariante, como se esperaba a partir de los resultados de la Figura 6.

Los resultados obtenidos con el controlador de orden entero presentan sobreimpulsos entre el 7 % y el 9 % y un tiempo de establecimiento promedio de 1.30 s. Es evidente el aumento proporcional del sobreimpulso con el valor del peso de la carga. Por otro lado, el controlador de orden fraccionario muestra un sobreimpulso prácticamente constante de alrededor del 8 % para todas las cargas y un tiempo de establecimiento promedio de 1.19 s.

El sobreimpulso obtenido en los experimentos es muy similar al de las simulaciones, lo que valida el esquema anti-windup y confirma que los problemas de saturación se han abordado correctamente. Este es un resultado importante que permite el uso de dispositivos de bajo costo con resultados realmente competitivos.

Se diseña una segunda prueba en tren de pulsos incremental entre 1 rad y 4 rad con la intención de validar el funcionamiento de los controladores para distintas consignas en posición, de forma secuencial. Esta prueba se realiza con cargas de 30 gr, 50 gr, 70 gr y 100 gr, colocadas en la parte superior del eslabón blando.

La Figura 10 y la Figura 11 presentan los resultados de la segunda prueba, con la implementación del control de orden entero y orden fraccionario, respectivamente. Los resultados obtenidos evidencian que la diferencia significativa se encuentra en el caso de la consigna de 4 rad, donde el controlador de orden entero tiene un comportamiento inestable para las cargas de 30 gr y 70 gr. Para los demás casos, los controladores mantienen una similitud en el funcionamiento.

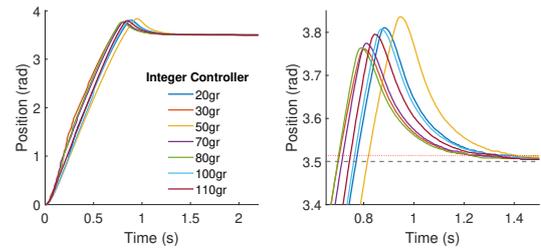


Figura 8: Resultados de las pruebas con carga en entrada escalón para el controlador de orden entero.

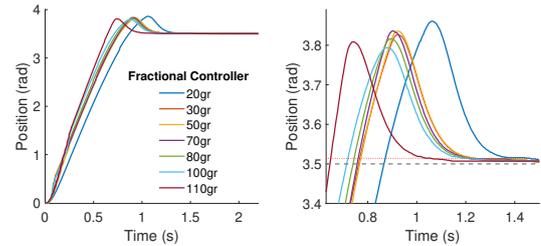


Figura 9: Resultados de las pruebas con carga en entrada escalón para el controlador de orden fraccionario.

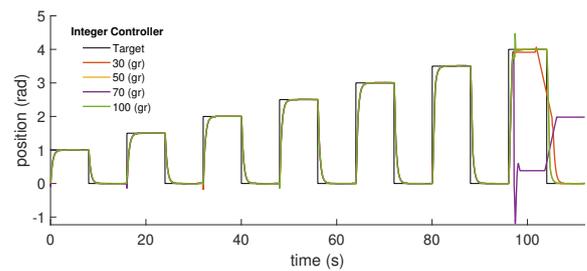


Figura 10: Resultados de las pruebas con carga en tren de pulsos para el controlador de orden entero.

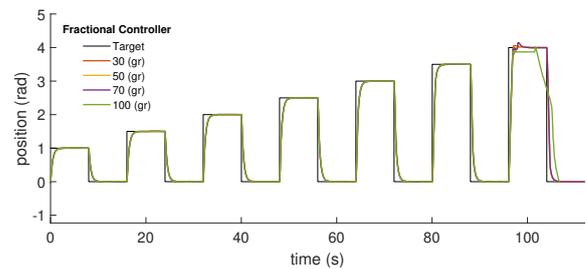


Figura 11: Resultados de las pruebas con carga en tren de pulsos para el controlador de orden fraccionario.

Los resultados obtenidos hasta ahora reflejan la respuesta del motor (medida a través del encoder de posición) con la implementación de los controladores entero y fraccionario diseñados. Sin embargo, esto no representa físicamente el comportamiento del plegado y desplegado del eslabón blando. Por ello, se propone como trabajo futuro, la implementación de sensores adicionales que permitan cerrar el lazo de control considerando el desplazamiento de la estructura de origami.

## 4. Conclusiones

La implementación del controlador fraccionario con anti-windup ha mostrado un rendimiento notable en la gestión de la saturación y otros problemas asociados a los actuadores de bajo coste utilizados en el prototipo actual del eslabón de origami, y ha mejorado la robustez del sistema frente a perturbaciones externas y variaciones en las cargas.

El uso de controladores de orden fraccionario permite superar las limitaciones de los controladores convencionales de orden entero, mostrando un comportamiento más estable y predecible, incluso con perturbaciones.

Los resultados experimentales confirman que el diseño del robot y el enfoque de control propuesto son efectivos para aplicaciones de robótica blanda, incluso con dispositivos de bajo coste.

## Agradecimientos

Estos resultados de investigación se enmarcan dentro de los proyectos ADAPTA, con referencia PLEC2023- 010218, financiado por MICIU /AEI /10.13039/501100011033, y SIROCO, con referencia PID2023-147343OB-I00, financiado por MICIU /AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

## Referencias

Åström, K. J., Hägglund, T., Astrom, K. J., 2006. Advanced PID control. Vol. 461. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society Research Triangle Park.

Belke, C. H., Paik, J., 2017. Mori: a modular origami robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22 (5), 2153–2164.

Firouzeh, A., Paik, J., 2017. An under-actuated origami gripper with adjustable stiffness joints for multiple grasp modes. *Smart Materials and Structures* 26 (5), 055035.

Koryo, M., 1985. Method of packaging and deployment of large membranes in space. The Institute of Space and Astronautical Science report 618, 1–9.

Kuribayashi, K., Tsuchiya, K., You, Z., Tomus, D., Umemoto, M., Ito, T., Sasaki, M., 2006. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of ni-rich tini shape memory alloy foil. *Materials Science and Engineering: A* 419 (1-2), 131–137.

Ljung, L., Söderström, T., 1983. Theory and practice of recursive identification. MIT press, pp. 136–250.

Mandsberg, N. K., Christfort, J. F., Kamguyan, K., Boisen, A., Srivastava, S. K., 2020. Orally ingestible medical devices for gut engineering. *Advanced drug delivery reviews* 165, 142–154.

Meloni, M., Cai, J., Zhang, Q., Sang-Hoon Lee, D., Li, M., Ma, R., Parashkevov, T. E., Feng, J., 2021. Engineering origami: A comprehensive review of recent applications, design methods, and tools. *Advanced Science* 8 (13), 2000636.

Mena, L., Muñoz, J., Monje, C. A., Martínez de la Casa, S., Balaguer, C., 2023. Estudio de una estructura de tipo origami como eslabón blando. In: *XLIV Jornadas de Automática*. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, pp. 650–654.

Mena, L., Muñoz, J., Monje, C. A., Balaguer, C., 2021. Modular and self-scalable origami robot: A first approach. *Mathematics* 9 (12). URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/12/1324> DOI: 10.3390/math9121324

Mena, L., Terryn, S., Vanderborgh, B., Monje, C. A., 2025. Reconfigurable modular soft actuator using origami structures with self-healing materials: Several technological opportunities for robotic applications. *IEEE Robotics & Automation Magazine*.

Monje, C. A., Chen, Y., Vinagre, B. M., Xue, D., Feliu-Batlle, V., 2010. Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media.

Muñoz, J., Monje, C. A., Nagua, L. F., Balaguer, C., may 2020. A graphical tuning method for fractional order controllers based on iso-slope phase curves. *ISA Transactions*. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.05.045

Njogu, P. M., Sanz-Izquierdo, B., Jun, S. Y., Kalman, G., Gao, S., Malas, A., Gibbons, G. J., 2020. Evaluation of planar inkjet-printed antennas on a low-cost origami flapping robot. *IEEE Access* 8, 164103–164113.

Tarbouriech, S., Garcia, G., Gomes da Silva Jr, J. M., Queinnec, I., Tarbouriech, S., Garcia, G., Gomes da Silva, J. M., Queinnec, I., 2011. An overview of anti-windup techniques. Stability and stabilization of linear systems with saturating actuators, 267–281.

Yogesh, S., Yogalakshmi, M., Abishek, M., Prasath, R. A., Madhusudan, G., 2021. Origami based folding techniques for solar panel applications. *IJEET* 12 (3), 158–164.

Zhakypov, Z., Paik, J., 2018. Design methodology for constructing multimaterial origami robots and machines. *IEEE Transactions on Robotics* 34 (1), 151–165.

Zirbel, S. A., Wilson, M. E., Magleby, S. P., Howell, L. L., 2013. An origami-inspired self-deployable array. In: *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. Vol. 56031. American Society of Mechanical Engineers, p. V001T01A026.