

Estudio de una estructura de tipo origami como eslabón blando.

Mena, L.^{a,*}, Muñoz, J.^a, Monje, C.A.^a, Martínez de la Casa, S.^a, Balaguer, C.^a

^aUniversidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad 30, 28911 Leganés, España.

To cite this article: Mena, L., Muñoz, J., Monje, C.A., Martínez de la Casa, S., Balaguer, C. 2023. Study of an origami structure as a soft link. XLIV Jornadas de Automática, 650-654. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.650>

Resumen

La robótica blanda es un campo relativamente nuevo que pretende reemplazar la robótica rígida tradicional por materiales y estructuras innovadoras y flexibles, que aportan libertad de movimiento, absorción de impactos y adaptación a entornos no controlados, entre otros. Este trabajo propone el estudio de una estructura de origami basada en el patrón de Kresling como eslabón blando, a partir del uso de materiales flexibles con memoria de forma. Este estudio pretende demostrar el comportamiento físico del origami partiendo de su geometría, a través de un accionamiento por tendón y la implementación de un sensor inercial que registra el ángulo de rotación relacionado con los grados de libertad que proporciona el patrón de Kresling.

Palabras clave: Estructura de origami, Patrón de Kresling, Eslabón blando, Robótica blanda.

Study of an origami structure as a soft link

Abstract

Soft robotics is a relatively new field that aims to replace traditional rigid robotics with innovative and flexible materials and structures that provide freedom of movement, shock absorption, and adaptation to uncontrolled environments, among others. This work proposes the study of an origami structure based on the Kresling pattern as a soft link, using flexible materials with shape memory. This study aims to demonstrate the physical behaviour of the origami based on its geometry, through a tendon drive and the implementation of an inertial sensor that registers the rotation angle related to the degrees of freedom provided by the Kresling pattern.

Keywords: Origami structure, Kresling pattern, Soft link, Soft robotics.

1. Introducción

El origami es la técnica antigua de plegado de papel, Hatori (2011), que en la actualidad es usada cada vez con más frecuencia en campos muy diferentes, como en dispositivos médicos, Taylor et al. (2017), Kuribayashi et al. (2006), aplicaciones biomédicas, Miyashita et al. (2015), Taylor et al. (2016), Zhu and Li (2014), baterías flexibles, Song et al. (2014) o incluso en el telescopio James Webb lanzado el año pasado, Gardner et al. (2006). El plegado de una superficie 2D con un patrón determinado puede cambiar las propiedades del material original, por ello las estructuras de origami se consideran metamateriales, Bertoldi et al. (2017).

Los patrones de origami también ocupan un lugar importante en el desarrollo de aplicaciones de robótica. Por ejemplo, Banerjee et al. propusieron en Banerjee et al. (2018) un prototipo utilizando el patrón de origami de Yoshimura, compuesto por dos muelles, hilos de nailon, un servomotor y piezas hexagonales impresas en 3D. Los muelles se encuentran en el interior del cilindro del origami, mientras que los hilos de nailon unen las piezas exteriores del cilindro y el motor. Gracias a esa configuración, el robot puede mostrar dos comportamientos: puede extenderse o comprimirse utilizando el motor o la fuerza de los muelles. De forma similar, Novelino et al. proponen en Novelino et al. (2020) un patrón de Kresling accionado por un material que responde magnéticamente (sin necesidad del uso de

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

hilos), lo que permite un acoplamiento modular en el que cada módulo puede actuar de forma independiente. Sin embargo, en este caso, el control solo puede desarrollar dos posiciones, plegado o desplegado, a diferencia de otros trabajos que pretenden controlar la posición de plegado que corresponde a la longitud de cada módulo.

El patrón Kresling se genera a partir de triángulos sucesivos que dan lugar a un poliedro. El triángulo principal se muestra en la Figura 1 (a) y la geometría se define 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 configuración Kresling genera dos grados de libertad cuando la estructura se pliega y despliega, es decir, al cambiar de estado, la estructura cambia de longitud y rota al mismo tiempo. La rotación está ligada al cambio de altura y se representa por el ángulo θ . La figura 1 (b) ilustra la estructura desplegada, donde se muestran el ángulo de rotación θ y la altura h . El valor de h se actualiza con el valor del ángulo δ que se forma entre la base del triángulo y el vértice C, considerando las Ecuaciones (1), (2) y (3).

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

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

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

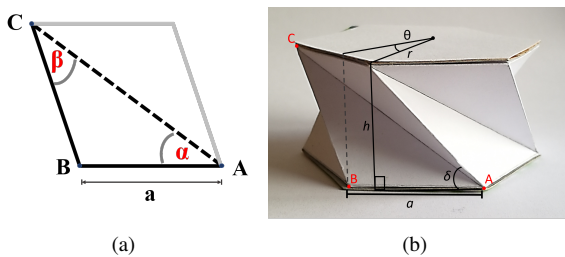


Figura 1: Patrón de origami de tipo Kresling.

La resistencia de la estructura viene determinada por los ángulos α y β , que son los principales parámetros de diseño para crear el poliedro cilíndrico. En el trabajo Mena et al. (2022) se analizaron diferentes configuraciones y se realizó un estudio del comportamiento del plegado, concluyendo que $a = 30$ mm, $\beta = 30^\circ$ y $\alpha = 38^\circ$ son adecuados para que la estructura pase del estado desplegado a plegado de forma continua y suave. Con dicha configuración, el origami se comportará según la Figura 2: altura máxima real $h=29,83$ mm, $\delta=0,94$ rad ($53,85^\circ$) y $\theta=0,304$ rad. El rango de rotación del ángulo θ es de $0,582$ rad ($33,34^\circ$), y para una rotación nula entre las bases del origami (ambas bases están en paralelo), $\theta=0,002$ rad y la altura es $h=21,46$ mm.

En trabajos anteriores Mena et al. (2021) se propuso un robot modular basado en el patrón de origami de Kresling. Se trata del prototipo que se muestra en la Figura 3a. Se compone de piezas rígidas y blandas. Se acciona mediante un mecanismo por cables, con un muelle interno que impulsa al origami a su posición extendida cuando el tendón está relajado. Este trabajo valida la cinemática, escalabilidad y control del prototipo; sin embargo, se observó que el dispositivo presentaba varios

problemas mecánicos, principalmente holguras y desalineación entre las piezas fijadas con tornillos.

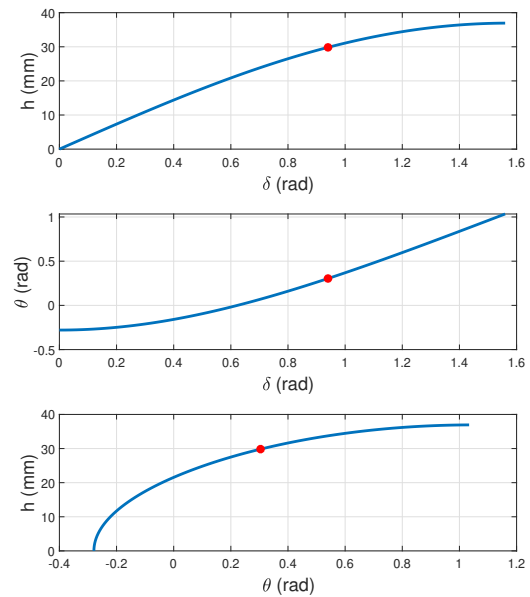


Figura 2: Características del origami con $a = 30$ mm, $\alpha = 38^\circ$ y $\beta = 30^\circ$. Mena et al. (2022)

En el presente trabajo se propone un nuevo prototipo donde se reemplazan los materiales de construcción. En lugar de piezas sólidas y el muelle, se utilizarán materiales laminados como el papel y el polipropileno. El papel es flexible y elástico, Balkcom (2004), lo que permite crear un prototipo sencillo, utilizando el propio material para impulsar la estructura hasta una posición extendida. Las Figuras 3b y 3c muestran el eslabón de Kresling hecho de papel (180 gr) y polipropileno translúcido (MP-PC146), respectivamente. Las partes superior e inferior son hexágonos impresos en 3D. Dado que la nueva posición por defecto del origami es extendida, se desplegará automáticamente, lo que evita el uso de un muelle interno. De esta manera se consigue un eslabón flexible sin la intervención de mecanismos en la estructura.

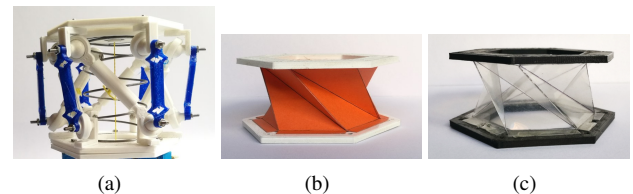


Figura 3: Prototipos de estructuras de Kresling. (a) Estructura mecánica con muelle interno Mena et al. (2021). (b) Estructura basada en papel. (c) Estructura translúcida a base de polipropileno.

La principal propiedad de este diseño es la escalabilidad del eslabón, controlada con un mecanismo accionado por cable implementado a tal efecto. El tendón se conecta a la plataforma superior, moviendo el origami a diferentes posiciones lineales en función de la longitud del tendón. Para ajustar la longitud del tendón se utiliza un micromotor de corriente continua, con una

relación de engranaje 210:1 y un mecanismo cabrestante (polea de 7,5 mm de radio). El motor incorpora un codificador de tipo Hall, que cuenta 28 impulsos de cuadratura por revolución del motor, proporcionando una resolución de $0,06^\circ$ en el lado del engranaje para medir la posición. El prototipo se muestra en la Figura 4.

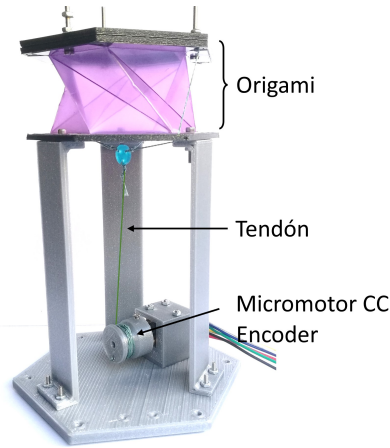


Figura 4: Prototipo basado en polipropileno.

La propuesta de este tipo de eslabón flexible basado en estructuras de origami, aporta escalabilidad frente a los eslabones convencionales, a partir del cual es posible crear cadenas cinemáticas innovadoras, donde un solo eslabón contiene 2 GDL.

2. Metodología

El trabajo previo Mena et al. (2022) muestra el estudio del diseño de un eslabón basado en el patrón de origami de tipo Kresling. En el presente artículo se pretende, además de la construcción del eslabón, realizar un estudio del comportamiento durante el plegado y desplegado del origami.

El movimiento es generado por el tendón a través del micromotor de CC. El esquema de control de posición está diseñado con un sistema de control de dos niveles: un lazo interno en velocidad, que resuelve los problemas de zona muerta del motor, y un lazo externo de control en posición, que da como resultado un sistema de servomotor.

Se ha diseñado un controlador de posición de orden fraccionario que cumple las especificaciones de frecuencia de corte $\omega_{gc} = 20$ rad/s y margen de fase $\phi_m = 65^\circ$, con el fin de crear un sistema robusto. Para la sintonía del controlador se utilizó el método iso-m descrito en Muñoz et al. (2020), obteniendo las siguientes constantes del controlador PD de orden fraccionario (FOPD): $\alpha = 1,3800$, $k_p = 30,6069$, $k_a = 0,2139$. La función de transferencia del controlador se muestra en la ecuación 4.

$$FOPD = 30,6069 + 0,2139s^{1,38} \quad (4)$$

La Figura 5 muestra la respuesta en frecuencia en lazo abierto y la respuesta temporal en lazo cerrado del sistema utilizando el controlador de orden fraccionario. Dicha respuesta presenta un sobreimpulso de un 11 % y un tiempo de establecimiento de 0,27 s.

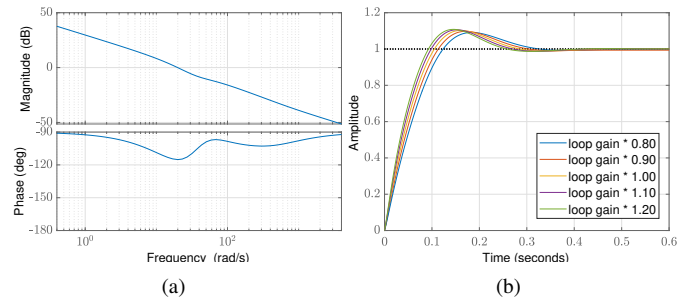


Figura 5: Control de posición con controlador de orden fraccionario. (a) Diagrama de Bode de lazo abierto; (b) Respuesta temporal de lazo cerrado.

La estructura de origami de tipo Kresling rota mientras ésta cambia de estado desplegado a plegado y viceversa, como se ha comentado en el apartado anterior sobre la relación de la altura h con los ángulos θ y δ . Para registrar el comportamiento del plegado se ha instalado un sensor inercial (IMU) en la parte superior del origami. Se trata del dispositivo Razor 9 DOF de Sparkfun, que dispone de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro, todos ellos de 3 ejes, conectados a un microcontrolador Atmega328. El ángulo de rotación θ del origami coincide con el ángulo *Yaw* de la IMU, como se ilustra en la Figura 6, por lo que éste será el dato principal para el análisis del comportamiento del eslabón.

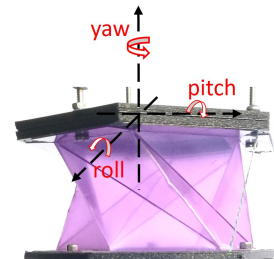


Figura 6: Ángulos de rotación sobre la estructura de origami.

3. Pruebas y Resultados

Como se ha descrito anteriormente, el comportamiento biestable del origami con patrón de Kresling es generado por el accionamiento del tendón conectado al motor de corriente continua, en el que se ha implementado un control en posición de orden fraccionario.

Se diseña una primera prueba que permita validar tanto el controlador en posición del motor como el funcionamiento de la IMU. Dicha prueba consiste en plegar el origami hasta alcanzar 2 rad de posición del motor, que corresponde a 15 mm de desplazamiento lineal de la estructura. La posición del motor es registrada con el encoder de efecto Hall y el ángulo de rotación θ con la IMU. Se realizan 7 ciclos con la intención de verificar la repetitividad en el funcionamiento. La Figura 7 contiene los resultados de la prueba. La curva azul representa la posición del motor y la curva roja el ángulo *Yaw* de la IMU. Es evidente el correcto funcionamiento del control de posición implementado, que alcanza las consignas tanto en el plegado como el desplegado de la estructura, considerando 0 radianes como el estado completamente desplegado. En el mismo sentido, el ángulo θ

registra un desplazamiento medio de $12,67^\circ$, validando así el segundo grado de libertad de la estructura de origami.

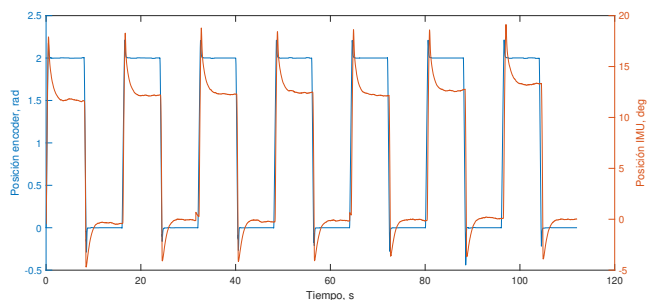


Figura 7: Prueba de 7 ciclos del origami accionado con el micromotor de CC.

Una vez obtenido el primer resultado, se diseña una segunda prueba con una consigna de 3 rad para el motor y 20 ciclos. En la Figura 8 se muestra el resultado. El comportamiento del motor según los datos del encoder es correcto a lo largo de los 20 ciclos, sin embargo, existe una deriva considerable en los datos del ángulo de rotación a partir del octavo ciclo. Lo remarcable de este resultado es que las mediciones de la IMU representan el comportamiento físico real del prototipo, por lo que, a pesar de que el motor alcance las consignas establecidas, el sistema está en lazo abierto, es decir, no se realimenta la posición final de la estructura medida por la IMU. Se trata de un motor de bajo coste con limitaciones, éste acumula un error de posición en cada ciclo, tanto en el plegado como en el desplegado del origami. Mientras no se realice un sistema de control en lazo cerrado, el uso de este motor para una prueba de repetitividad queda descartado.

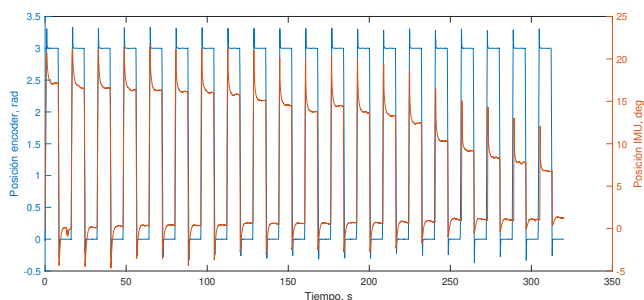


Figura 8: Prueba de 20 ciclos accionado con el micromotor de CC.

Por lo tanto, ha sido necesario reemplazar el micromotor de bajo coste por un motor a pasos de tipo nema 17hs4401, con un ángulo de paso de $1,8^\circ$ para la prueba de repetitividad. El control de giro del motor, la conmutación de las bobinas y la configuración de la fracción de pasos se realizará a través del driver A4988. Para obtener la máxima precisión del motor se utiliza una resolución de 1/16 de paso, por lo tanto, los pines MS1, MS2 y MS3 del driver se conectan a 5V.

Una vez realizado el cambio del motor se diseña una prueba de validación con 8 ciclos y el desplazamiento similar a la primera prueba realizada con el micromotor. Los resultados de esta prueba se presentan en la Figura 9. La prueba inicia en un estado de reposo los primeros 25 s, para verificar la lectura correcta de los datos de la IMU. A partir de ahí se comprime el

origami 8 veces con un periodo de 11,20 s. Los datos obtenidos reflejan el funcionamiento adecuado y esperado del origami. Por lo que se prepara una siguiente prueba con las siguientes características: 12 ciclos, mayor desplazamiento en el plegado con $23,5\text{mm}$ y un periodo de 30,60 s.

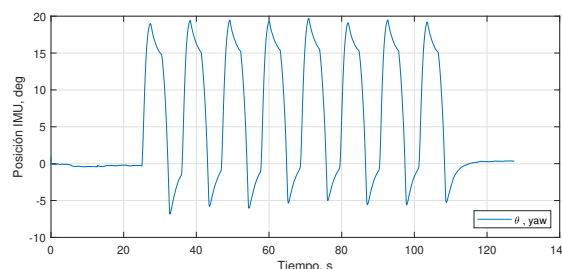


Figura 9: Prueba de 8 ciclos del origami accionado con el motor a pasos.

Esta segunda prueba con el motor a pasos tiene como resultado la Figura 10. Los 12 ciclos se han completado correctamente y el periodo de tiempo ha sido adecuado para que los valores de la IMU se estabilicen una vez alcanzada la posición deseada. Se puede apreciar una ligera deriva en el retorno a la posición inicial de $1,09^\circ$.

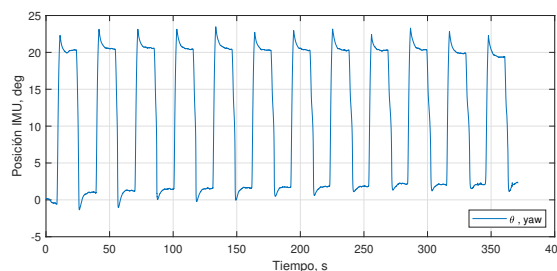


Figura 10: Prueba de 12 ciclos del origami accionado con el motor a pasos.

A partir de estos resultados favorables, se diseña una tercera prueba con las mismas características de la prueba anterior, pero esta vez con 43 ciclos. En esta prueba, además de registrar el ángulo *Yaw* que corresponde al ángulo θ , se incluyen los ángulos *Pitch* y *Roll* del sensor inercial, con la intención de conocer el comportamiento del origami en los ejes *X* e *Y*, respectivamente.

El resultado de la prueba se muestra en la Figura 11, donde es posible comprobar la repetitividad del funcionamiento bies- table de la estructura de origami a través del ángulo θ , presentando una deriva de $0,94^\circ$ en el plegado y de $0,96^\circ$ en el retorno a la posición inicial.

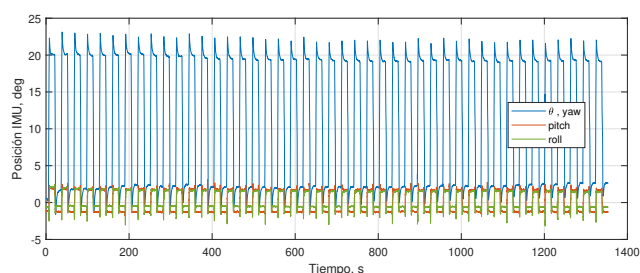


Figura 11: Prueba de 43 ciclos del origami accionado con el motor a pasos.

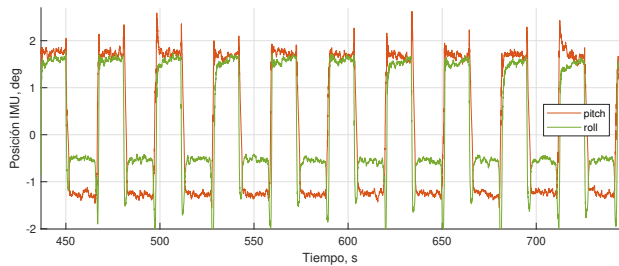


Figura 12: Ángulos *Pitch* y *Roll* en la prueba de 43 ciclos del origami accionado con el motor a pasos.

La cinemática simplificada del patrón de Kresling indica un desplazamiento h en el eje Z y una rotación θ sobre el mismo. Sin embargo, al registrar los valores de *Pitch* y *Roll* de la IMU se pueden apreciar ligeros desplazamientos en los 2 ejes restantes. En la Figura 12 se encuentran los valores registrados a lo largo de la última prueba, donde se observa un comportamiento repetitivo también en estos dos ángulos y con un rango de variación de $3,08^\circ$ en *Pitch* y $2,11^\circ$ en *Roll*. Este resultado amplía las funcionalidades de la estructura de origami con el patrón de Kresling.

4. Conclusiones

Este trabajo ha permitido demostrar el comportamiento físico de la estructura de origami basada en el patrón de Kresling. Se ha validado que la construcción del eslabón usando una lámina de polipropileno no requiere de mecanismos adicionales para recuperar su posición inicial después del plegado, es decir, este metamaterial tiene la propiedad de memoria de forma. Esto último se ha validado a partir de las pruebas de repetitividad, donde se ha plegado y desplegado al origami hasta 43 veces sin sufrir cambios en el comportamiento de la rotación del ángulo θ correspondiente al ángulo *Yaw* del sensor inercial.

Por otro lado, el sensor inercial instalado en la cara superior de la estructura, además de proporcionar información del ángulo θ relacionado directamente con la geometría del origami, ha permitido medir los ángulos *Pitch* y *Roll*. Los datos de *Pitch* y *Roll* amplían la funcionalidad de la estructura, de tal manera que en un futuro será posible generar movimientos controlados en relación a estos dos ángulos, aportando 2 grados de libertad adicionales al origami.

En cuanto al control en posición del motor, este trabajo ha demostrado que, a pesar de emplear un motor de bajo coste con prestaciones limitadas, el control es adecuado. En cualquier caso, se demuestra igualmente la idoneidad de aplicar un control de posición del origami en lazo cerrado a través de la IMU, lo que se abordará en un trabajo futuro.

El eslabón que se ha presentado, puede ser utilizado como un módulo dentro de una cadena cinemática modular, con aplicaciones interesantes como manipulador flexible capaz de alcanzar posiciones lineales y angulares a la vez.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados ha recibido financiación del proyecto SOFIA: Articulación blanda inteligente con capacidades de reconfiguración y modularidad para plataformas robóticas, con referencia PID2020-13194GB-I00, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Referencias

- Balkcom, D., 2004. Robotic origami folding. Carnegie Mellon University.
- Banerjee, H., Pusalkar, N., Ren, H., 2018. Single-motor controlled tendon-driven peristaltic soft origami robot. *Journal of Mechanisms and Robotics* 10 (6).
- Bertoldi, K., Vitelli, V., Christensen, J., Van Hecke, M., 2017. Flexible mechanical metamaterials. *Nature Reviews Materials* 2 (11), 1–11.
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., et al., 2006. The James Webb Space Telescope. *Space Science Reviews* 123 (4), 485–606.
- Hatori, K., 2011. History of origami in the east and the west before interfusion. In: *Origami 5: Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education*. pp. 1–13.
- Kuribayashi, K., Tsuchiya, K., You, Z., Tomus, D., Umamoto, M., Ito, T., Sasaki, M., 2006. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of ni-rich thin shape memory alloy foil. *Materials Science and Engineering: A* 419 (1), 131–137.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305014930>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.016>
- Mena, L., Monje, C. A., Balaguer, C., 2022. Origami Kresling pattern as soft scalable link. In: *Jornadas de Robótica, Educación en Automática y Bioingeniería*. pp. 70–74.
- 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
- Miyashita, S., Guitron, S., Ludersdorfer, M., Sung, C. R., Rus, D., 2015. An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, pp. 1490–1496.
- 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
- Novelino, L. S., Ze, Q., Wu, S., Paulino, G. H., Zhao, R., 2020. Untethered control of functional origami microrobots with distributed actuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (39), 24096–24101.
- Song, Z., Ma, T., Tang, R., Cheng, Q., Wang, X., Krishnaraju, D., Panat, R., Chan, C. K., Yu, H., Jiang, H., 2014. Origami lithium-ion batteries. *Nature communications* 5 (1), 1–6.
- Taylor, A., Miller, M., Fok, M., Nilsson, K., Tsz Ho Tse, Z., 2016. Intracardiac magnetic resonance imaging catheter with origami deployable mechanisms. *Journal of Medical Devices* 10 (2).
- Taylor, A. J., Chen, Y., Fok, M., Berman, A., Nilsson, K., Ho Tse, Z. T., 2017. Cardiovascular catheter with an expandable origami structure. *Journal of Medical Devices* 11 (3).
- Zhu, S., Li, T., 2014. Hydrogenation-assisted graphene origami and its application in programmable molecular mass uptake, storage, and release. *ACS nano* 8 (3), 2864–2872.