

ARTÍCULO ACEPTADO

El Arte de los Origamis como Actuadores en la Robótica Suave

Juana-Mariel Dávila-Vilchis, Gustavo Levy Lara Morales, Adriana Herlinda Vilchis González, Melissa Días-Omonte, Juan Carlos Ávila Vilchis y Juan Manuel Jacinto-Villegas

Introducción

La palabra origami proviene del japonés *Ori* (doblez) y *Kami* (papel), cuyo origen se identifica como una actividad de entretenimiento. Este arte consiste en construir estructuras geométricas 3D de animales, flores u objetos con locomoción propia mediante diferentes dobleces secuenciales en papel, sin dañarlo [1]. Actualmente, esta técnica se ha aplicado en diversas áreas como Ingeniería, Arquitectura o Medicina. Por ejemplo, en el diseño de construcciones, barcos, transportadores espaciales o dispositivos médicos.

Otra aplicación de los origamis es en robótica suave donde se busca el desarrollo de dispositivos que estén dotados con movimientos prediseñados, múltiples grados de libertad, que sean capaces de emular movimientos naturales durante su accionamiento y que estén hechos de materiales ligeros [2]. En este contexto, un robot suave es accionado por medio de un *Origami Soft Actuator* (OSA) para ejecutar una tarea específica, que es controlada por un microcontrolador y una interfase, para ser empleado por un usuario. Los diseños poseen diferentes estructuras y morfologías, mayormente inspiradas en sistemas biológicos. Sus arquitecturas son variables dependiendo de un patrón geométrico, del número de capas a usar, de la técnica de doblez, del tipo de papel empleado y del espesor de este. Sus configuraciones incluyen modelos individuales, compuestos o modulares [2].

Las principales ventajas de los OSA son su versatilidad de formas, las cuales se caracterizan por tener estructuras compactas con la capacidad de ser reconfigurables a múltiples escalas. Además, al poderse doblar, se reducen el número de componentes y los costos gracias a la simplicidad de fabricación [3].

Los diseños OSA para robots médicos de rehabilitación o asistencia son variados, debido a la movilidad deseada, al número de grados de libertad (GDL), y a las tareas objetivo. Por ejemplo, el movimiento de flexo-extensión para miembros superiores se ha logrado por medio de los patrones de Zigzag y de Yoshimura. Para realizar en conjunto los movimientos de extensión, contracción y rotación se han empleado las estructuras Twisted Tower o Kresling.

Los origamis se pueden construir por dobleces a partir de un patrón 2D en papel o láminas de metal o plástico. Actualmente, la manufactura aditiva y la técnica de prototipado rápido utilizan poliuretano termoplástico (TPU), ácido poliláctico (PLA) o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) en la construcción de origamis. Por otra parte, los origamis pueden ser accionados por cables, por sistemas neumáticos de vacío, por materiales piezoeléctricos, Shape Memory Alloys (SMA) o Shape Memory Polymers (SMP) y su control está enfocado en regular la presión o las fuerzas para alcanzar el doblez deseado [4].

La literatura se ha enfocado en el diseño, modelado, simulación, fabricación y control de sistemas OSA [5], lo que motiva a presentar una metodología de caracterización de los origamis para el movimiento de flexo-extensión, con sus parámetros geométricos, proceso de impresión 3D, así como pruebas experimentales que validan su funcionamiento.

Los OSA son actuadores suaves, por lo que su uso en robótica suave los ubica en desafíos específicos de interacción segura con usuarios (pacientes o equipo médico, por ejemplo); para tareas de sujeción, regulación o seguimiento de trayectorias (flexo-extensión, por ejemplo) o de reconfiguración en tareas específicas como cirugía.

Origamis: Arte Japonés en Robótica Médica

En este documento se establecen guías de diseño que facilitan el desarrollo de futuros origamis aplicados a dispositivos médicos u otras áreas que busquen trabajar con actuadores suaves.

Diseño de los origamis

El primer paso para crear un Soft Origami, es identificar la naturaleza del movimiento a realizar para la correcta

definición de su tipo, diseño y material, ya que pudiera ser frágil y romperse, o ser grueso y no poder doblarse. Además, es necesario determinar la fuerza requerida a aplicar, así como el tipo de actuación para lograrla. A continuación, se presenta una descripción detallada de 3 origamis neumáticos, 2 para flexo-extensión (Zigzag y Yoshimura) y 1 para rotación (Kresling), donde se incluye el diseño, fabricación y caracterización de sus

principales parámetros, como referente.

Los origamis neumáticos se contraen o expanden por medio de deflación o inflación, respectivamente. Requieren de una máquina de vacío o de un compresor para su accionamiento [6], pueden ser colocados dentro de contenedores plásticos sellados por calor o en estructuras 3D que contienen aire, formando n capas.

Origamis Zigzag: Se caracterizan por tener dobleces triangulares invertidos definidos por su longitud total L , su longitud del doblez l , y un ángulo interno (por ejemplo 60°) [7] (ver Figura 1). Es posible realizar movimientos de flexo-extensión dentro de bolsas plásticas selladas que funcionan al vacío y pueden soportar diferentes cargas.

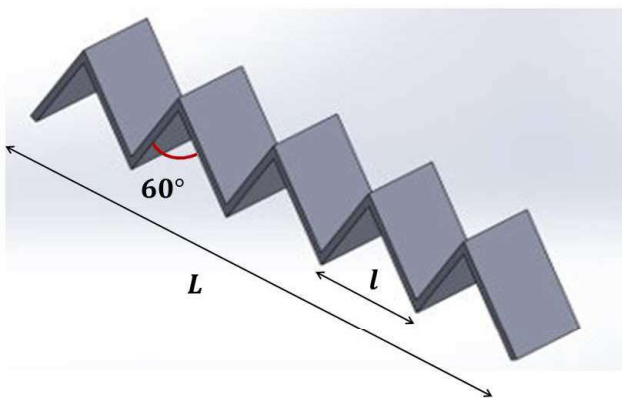


Figura 1. Modelo Zigzag (5 capas) en 3D.

Origamis Yoshimura: Su patrón es de una sola pieza. Se caracteriza por formar caras romboidales durante su doblez o impresión 3D. Está definido por un rectángulo de longitud L y ancho w , dividido por 6 triángulos de 30° , cuyos bordes coinciden con pliegues en cresta o valle al ir doblándose (ver Figura 2). Puede ser accionado dentro de una bolsa plástica o contener aire en su interior para lograr la flexo-extensión [4].

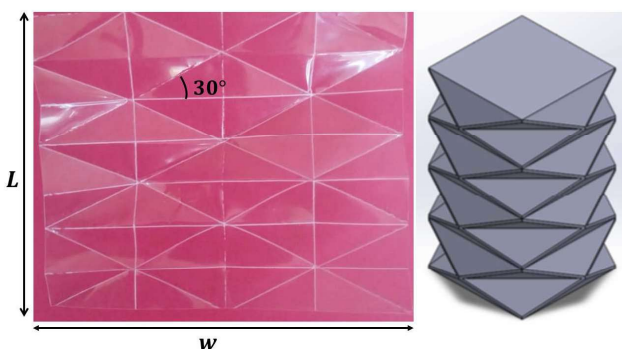


Figura 2. Patrón Yoshimura (4 capas) en acetato de vinil y modelo 3D.

Origamis Kresling: Tienen forma de espiral con 2 GDL: traslación y rotación simultánea. El modelo consta de dos polígonos en sus extremos, generalmente octogonales, conectados en sus vértices por un patrón de paralelogramos en una sola dirección formando n capas [4]. Lo caracterizan varios parámetros como longitudes, alturas, radios, ángulos de giro, número de caras y número de capas (ver Figura 3).

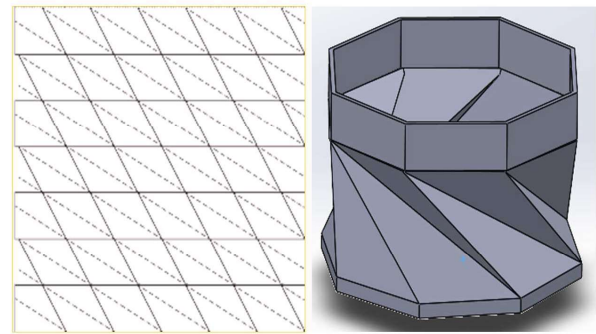


Figura 3. Patrón Kresling (1 capa) y modelo 3D.

Fabricación de los origamis

Se emplearon los métodos de Dobleces y de Impresión 3D para la fabricación de los modelos anteriores. Para ambos se utilizaron materiales con diferentes propiedades. La Figura 4 muestra los productos obtenidos por ambos métodos y cambios en sus parámetros: diferentes tamaños, número de capas y materiales, tanto con doblez (1-3) como en impresión 3D (4-6).



Figura 4. Modelos 3D Yoshimura, Kresling y Zigzag en doblez (1-3) e impresión con TPU (4-6).

1. Dobleces: Consiste en doblar el patrón de cada modelo para obtener una estructura 3D de n capas. Se hicieron pruebas con papel de espesores de 0.11 mm, 0.13 mm, 0.20 mm y 0.32 mm y con vinil de acetato de 0.34 mm. Se construyeron modelos de diferentes tamaños. Usando papel opalina de 0.20 mm se logró el mejor doblez y la mejor rigidez.

2. Impresión 3D: A partir de un modelo CAD, se generó un archivo con extensión stl (Stereolithography) y otro con extensión gcode para impresión 3D. Para este trabajo se utilizó el software UltimakerCura® y la impresora Ender 3sl®, definiendo parámetros de velocidad, espesor y temperatura. El modelo Zigzag se imprimió con TPU-95A SAINSMART® y, posteriormente, se realizó el sellado de su bolsa y el ensamble de conectores y manguera. Para el modelo Yoshimura se utilizó TPU-85A NinjaTek® y para el modelo Kresling TPU-92A Creativity®.

Caracterización de los origamis

Se hicieron pruebas experimentales de vacío para caracterizar el comportamiento de los origamis, donde se utilizaron un compresor TRUPER® de 58 psi, un eyector de vacío VN-10-H-T3PQ2-VQ2-RQ2 FESTO® y manguera de 10 mm de diámetro interior. La Tabla 1 muestra los parámetros de diseño de cada uno de los modelos Zigzag (Zz), Yoshimura (Y) y Kresling (K) y sus valores que incluyen: tipo (Ti), dimensiones (Di), dureza del material (Ma), espesor teórico (Es), porcentaje de relleno de impresión (Re), número de capas (Nc) y evaluación de su desempeño (D): funcional (✓) o no funcional (x).

Tabla 1. Parámetros de modelos impresos.

Ti	Di [mm]	Ma	Es (mm)	Re %	Nc	D
Zz	150x30	TPU 95A	1	20	5	✓
Y1	30x30x51	TPU 85A	1	20	4	✓
Y2	30x30x36	TPU 85A	1	20	3	✓
Y3	30x30x51	TPU 85A	0.5	20	4	✓
Y4	50x50x208	TPU 92A	0.5	20	10	x
Y5	50x50x82	TPU 92A	0.8	20	4	✓
Y6	25x25x97	TPU 92A	1	20	4	x
K1	40x54x54	TPU 92A	0.90	20	1	✓
K2	24x24x60	TPU 92A	0.45	20	4	✓
K3	54x54x120	TPU 85A	0.4	20	4	x

Resultados

Se caracterizaron experimentalmente los parámetros de diseño en cada uno de los origamis con diferentes configuraciones.

De estas pruebas se determinó que cada uno de los parámetros define la calidad de la pieza final para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, para espesores delgados se requiere menor presión de succión; sin embargo, las piezas son frágiles y se rompen si la presión de succión excede un cierto valor o si se presentan áreas con rupturas relativamente de fácil generación (uniones).

El origami Zigzag fue el de diseño más simple y permitió levantar un candado de 250 g, tal como se observa en la Figura 5, desde su posición original hasta su contracción final. La capacidad de carga máxima dependerá del material utilizado, del calibre de la bolsa y de la presión de vacío.

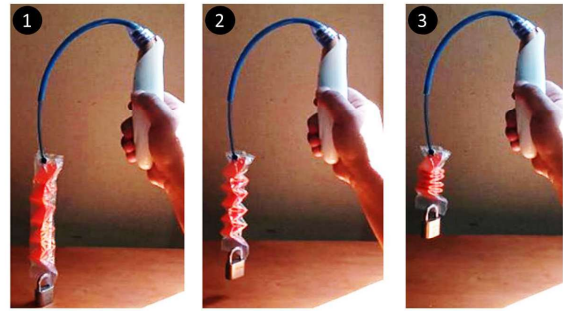


Figura 5. Origami Zigzag: 1) posición original, 2) extracción de vacío, 3) contracción total.

Los origamis Yoshimura y Kresling impresos en 3D también se pudieron elongar y contraer satisfactoriamente. La Figura 6 muestra el modelo Kresling en prueba de vacío: 1) origami en su estado inicial, 2) origami en contracción y 3) eyector de vacío. La regulación del aire se realizó manualmente para estas pruebas, por lo que, bajo un sistema de control automático, se esperarían resultados aún más satisfactorios. Este tipo de pruebas permite determinar rangos de operación de presiones en condiciones seguras.

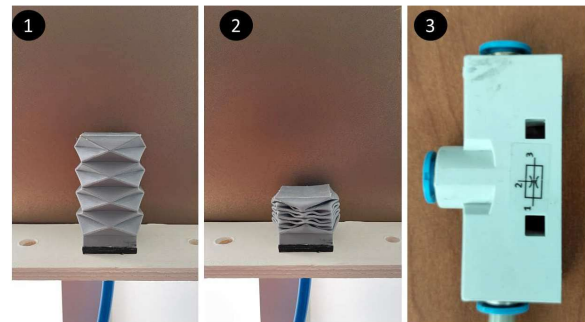


Figura 6. Sistema de pruebas de vacío.

Conclusiones

Este artículo reporta un panorama general de diseño, fabricación y caracterización de los origamis Zigzag, Yoshimura y Kresling para accionamiento de robots suaves. Estos actuadores pueden emplearse en tareas de flexo-extensión o rotación gracias a su capacidad para reconfigurarse. Sus parámetros de diseño pueden variar dependiendo del rango de movilidad y del tipo de movimiento deseados. Por ejemplo: largo, ancho, diámetro, número de capas, espesor y tipo de material deben ser definidos detalladamente.

Algunas de las métricas de interés para evaluar el desempeño de actuadores suaves basados en origamis son la capacidad de carga, el ciclo de vida, la rigidez y los retardos inherentes al proceso de deformación/recuperación de cada configuración, por ejemplo.

Estos actuadores pueden generar movimientos de traslación, de rotación o la combinación de estos. Como aplicaciones médicas se identifican la rehabilitación física y ocupacional, la asistencia, o la dosificación de medicamentos. El proceso de fabricación de estos actuadores, su dependencia de un generador de vacío o de un compresor y la relativa fragilidad de los materiales utilizados son las principales limitantes para su uso.

Para la impresión 3D se recomienda usar filamento con dureza mayor a 85A y menor o igual a 92A debido a su facilidad de impresión con extrusor directo, ya que estos filamentos son más flexibles que el 95A. Al utilizar el TPU 95A de marca Creality®[®], se realizaron varias pruebas teniendo que disminuir el espesor de las paredes durante la impresión para lograr que los modelos tuvieran un grado de flexibilidad aceptable. Se sugiere imprimir una torre de temperatura para el filamento seleccionado antes de imprimir un modelo, para determinar el valor de temperatura que garantice la fusión del material entre capas.

El uso de origamis en sistemas robóticos complejos se ha considerado a través de sistemas modulares, donde la combinación de diferentes origamis generaría una variedad de GDL para la realización de tareas complejas (como rotaciones sucesivas de un bisturí, por ejemplo) por la interacción de dichos módulos. Una aplicación po-

tencial de estos sistemas complejos modulares sería la cirugía mínimamente invasiva, donde un sistema robótico basado en origamis modulares se introdujera plegado al cuerpo humano y, una vez en su interior, se desplegara para realizar las tareas requeridas.*

REFERENCIAS

1. Zhai, Z., Wang, Y., y Hanqing Jiang. (2018). Origami-inspired, on-demand deployable and collapsible mechanical materials with tunable stiffness, 115(9), 1-6.
2. Zaghoul, A. y Bone, G. M. (2023). Origami-Inspired Soft Pneumatic Actuators: Generalization and Design Optimization. *Actuators*, 12(2), 72.
3. Fei, F., Leng, Y., Xian, S., et al. (2022). Design of an Origami Crawling Robot with Reconfigurable Sliding Feet. *Applied Sciences*, 12(5), 2520.
4. Son, H., Park, Y., et al (2022). 4D Multiscale Origami Soft Robots: A Review. *Polymers*, 14(19), 4235.
5. Rus, D. y Tolley, M. T. (2018). Design, fabrication and control of origami robots. *Nature Reviews Materials*, 3(6), 102-112.
6. Zhang, Z., Fan, W., Chen, G., et al. (2021). A 3D printable origami vacuum pneumatic artificial muscle with fast and powerful motion. En *Proc. 4th International Conference on Soft Robotics*, 551-554.
7. Li, S., Vogt, D. M., Rus, D. y Wood, R. J. (2017). Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(50), 13132-13137.

SOBRE LOS AUTORES



Juana-Mariel Dávila-Vilchis es Doctora en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Sus áreas de interés son la robótica suave y tecnología médica aplicada a tareas de rehabilitación y/o asistencia. Actualmente, es académica e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la UAEM.



Gustavo Levy Lara Morales es alumno del 8° semestre de la Licenciatura de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la UAEM. Sus intereses son el Diseño Mecánico en CAD, las técnicas de impresión 3D, así como el desarrollo de los origamis soft actuators.



Adriana Herlinda Vilchis González sus estudios de Doctorado en el Instituto Politécnico de Grenoble, Francia, están enfocados a Visión y Robótica. Actualmente, es profesor investigador en las Facultades de Ingeniería y de Medicina de la UAEM. Sus intereses incluyen robótica médica, robots suaves y sistemas mecatrónicos.



Melissa Días Omonte es alumna del 8° semestre de Ingeniería Generalista en la Escuela de Ingenieros de Centrale Marseille en Francia. Como parte de sus estudios realizó una estancia de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UAEM, con el proyecto uso de origamis en la robótica suave.



Juan Carlos Ávila Vilchis obtuvo el grado de Doctor en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia. Actualmente es profesor investigador en las Facultades de Ingeniería y de Medicina de la UAEM. Sus intereses científicos incluyen modelado, análisis y control de sistemas no lineales y robótica médica.



Juan Manuel Jacinto Villegas Doctor en Tecnologías Digitales Emergentes en Robótica Perceptual de la Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italia. Sus áreas de intereses incluyen robótica, control háptico, interacción humano-robot, electrónica, mecatrónica y automatización.

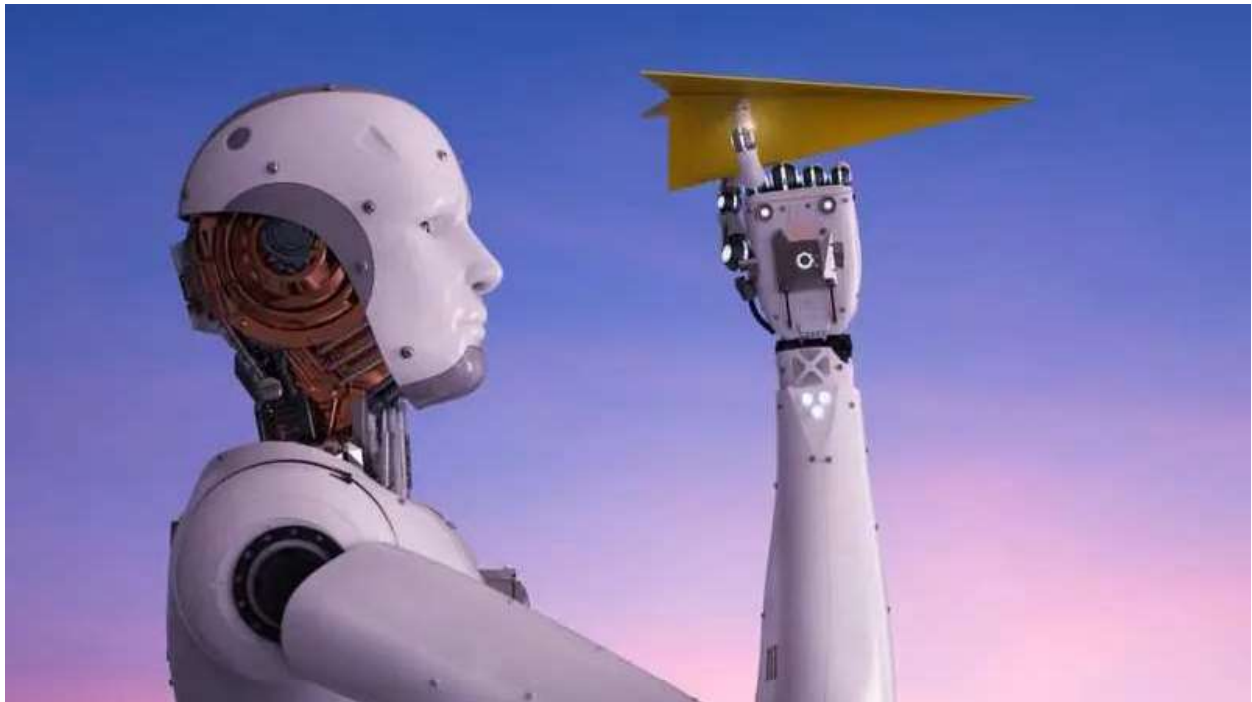


Imagen tomada de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50561369>.