

Jornadas de Automática

Conector rotacional blando para robots modulares.

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

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

To cite this article: Mena, L., Sánchez, C., Monje, C. A., Martínez de la Casa, S., Balaguer, C. 2024. Soft rotational connector for modular robots. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10784>

Resumen

Los robots modulares pueden adaptarse dinámicamente a diversas tareas o entornos, lo que los hace versátiles, eficientes y económicos. En este trabajo se propone el diseño de un componente de conexión para generar cadenas modulares flexibles, donde tanto el módulo como el conector son estructuras blandas. El módulo se compone de una configuración plegable basada en origami, que es fácilmente apilable mediante conexiones simples entre módulos. Con el objetivo de ampliar la funcionalidad de una cadena de módulos de origami apilados, se sugiere el uso de conectores rotacionales que permitan reorientar la cadena modular. Este estudio presenta el diseño y la validación de un conector blando capaz de rotar alrededor de dos ejes, utilizando un eslabón blando accionado por tendones.

Palabras clave: Robotica blanda, Robots modulares, Estructuras de origami

Soft rotational connector for modular robots

Abstract

Modular robots can be dynamically adapted to various tasks or environments, making them versatile, efficient and cost-effective. This paper proposes the design of a connection component to generate flexible modular chains, where both the module and the connector are soft structures. The module is comprised of a foldable origami-based configuration, which is easily stackable by simple connections between modules. In order to extend the functionality of a stacked origami module chain, the use of rotational connectors is suggested to reorient the modular chain. This study presents the design and validation of a soft connector able to rotate around two axes, using a tendon-driven soft link.

Keywords: Soft robotics, Modular robots, Origami structures

1. Introducción

Un sistema robótico modular puede describirse como conjuntos de eslabones unidos entre sí para producir una estructura modular Ahmadzadeh et al. (2016). Este tipo de configuración ha sido objeto de investigación por un gran número de autores desde 1988, como CEBOT Fukuda and Nakagawa (1988) y CMU RMMS Schmitz (1988). La literatura define a los robots modulares con cuatro componentes: módulo, información, tarea y entorno Ahmadzadeh et al. (2016). Además del módulo, los otros tres componentes pueden extrapolarse a cualquier sistema robótico. Por lo tanto, las unidades modula-

res son la base esencial y el núcleo de los robots modulares. Los módulos pueden disponerse físicamente en diferentes arquitecturas: cadena Yim (1993), enrejado Romanishin et al. (2013), móvil Wolfe et al. (2012), híbrido Davey et al. (2012), de tipo cercha Galloway et al. (2010), y estilo libre Donald et al. (2006).

La modularidad en los robots blandos es un enfoque económico y eficiente que les permite adaptarse de manera dinámica a diversas tareas y entornos a través de la reconfiguración de sus módulos, logrando capacidades complejas. Este enfoque introduce un método sencillo y rápido para la fabri-

^{*}Autor para correspondencia: lmena@pa.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

cación y reparación de robots blandos multifuncionales.

Los robots blandos modulares (MSR - modular soft robots) son muy versátiles y personalizables gracias a su diseño, que incluye varias unidades modulares y mecanismos de conexión. Esta naturaleza versátil de los MSR puede encontrarse en aplicaciones tan diversas como: dispositivos médicos Gu et al. (2023), pinzas blandas modulares industriales Phillips et al. (2018); Homberg et al. (2015), o en búsqueda y rescate Drotman et al. (2017); Rafsanjani et al. (2018).

Los MSR pueden clasificarse en tres tipos: ensamblados, reconfigurables y autorreconfigurables. Los MSR ensamblados tienen una disposición fija de los módulos, lo que los hace útiles para montaje, almacenamiento y transporte fácil, así como para una rápida sustitución de los módulos Qin et al. (2018). Los MSR reconfigurables ofrecen versatilidad mediante el diseño de unidades modulares, lo que permite sustituciones rápidas y multifuncionalidad Robertson and Paik (2017). Los MSR autorreconfigurables tienen la capacidad de adaptarse de manera autónoma a tareas y entornos variables. No obstante, enfrentan desafíos como la autoconciencia y la intercomunicación entre los módulos Zou et al. (2018).

Los MSR utilizan cuatro mecanismos de conexión principales: mecánicos, magnéticos, adhesivos y de vacío. La elección del mecanismo depende de las características del MSR. Las conexiones mecánicas, como las de pasador y orificio, ganchos, cerradura y llave, o coincidencia de forma, proporcionan una gran precisión de alineación y resistencia, pero pueden ser difíciles de separar para obtener reconfiguraciones Kurumaya et al. (2018). Las conexiones magnéticas permiten un desacoplamiento fácil y conexiones reversibles, pero requieren piezas adicionales, lo que reduce la versatilidad Lee and Cho (2017); Zou et al. (2018). Las conexiones adhesivas son sencillas, pero suelen ser puntuales y requieren energía adicional Wang and Iida (2012); Germann et al. (2012). Finalmente, las conexiones por vacío proporcionan enlaces fuertes, pero requieren el accionamiento de una bomba Sayed et al. (2021); Jiao et al. (2019). Aunque se están explorando métodos novedosos, como las conexiones electrostáticas y por fusión en caliente, persisten desafíos como mantener la flexibilidad, asegurar una desconexión fácil y permitir el intercambio inalámbrico de información entre módulos.

El mecanismo de conexión entre módulos dependerá del tipo de módulo y de la aplicación concreta del robot. En este trabajo se pretende diseñar una conexión para módulos blandos que permita generar una cadena modular. Los módulos para los que se crea esta conexión están basados en las estructuras de tipo origami con una configuración de patrón de Kresling presentada en Mena et al. (2023). El origami es una técnica ancestral que consigue formar figuras o estructuras tridimensionales a través del plegado de papel. La característica que define al módulo es su capacidad de plegado, permitiéndole redimensionar su longitud. Durante este comportamiento, el módulo es capaz de rotar sobre su eje central.

La Figura 1 muestra dos tipos de conexiones para este tipo de módulo: una conexión simple para colocar módulos en una configuración secuencial y un conector rotacional que, idealmente, sea capaz de girar a lo largo de los tres ejes (XYZ) para permitir la unión de varios módulos. La cadena cinemática en el caso ideal con tres ejes de rotación puede moverse tanto en un plano como en un espacio tridimensional. Cuando rota

sobre el eje Z, produce un movimiento similar al de una serpiente, mientras que la rotación en el eje Y puede compararse al movimiento de un dedo o un brazo, según el número y la longitud de los módulos conectados.

Considerando la rotación intrínseca del módulo en el eje Z, es posible reducir la rotación a 2 GDL (grados de libertad), en Pitch y Roll correspondientes a los ejes X e Y, respectivamente. Una primera aproximación a este conector se presenta en Mena et al. (2022). Se trata de una articulación de 2 GDL cuya construcción se basa en engranajes dispuestos perpendicularmente que cumplen con los requerimientos de movilidad entre los módulos de origami que conecta. Sin embargo, los mecanismos de actuación son rígidos. En este trabajo se propone una conexión de rotación flexible, como elemento de una cadena modular blanda. Para alcanzar este objetivo, se propone un eslabón blando con propiedades de flexión y con una actuación por tendones.

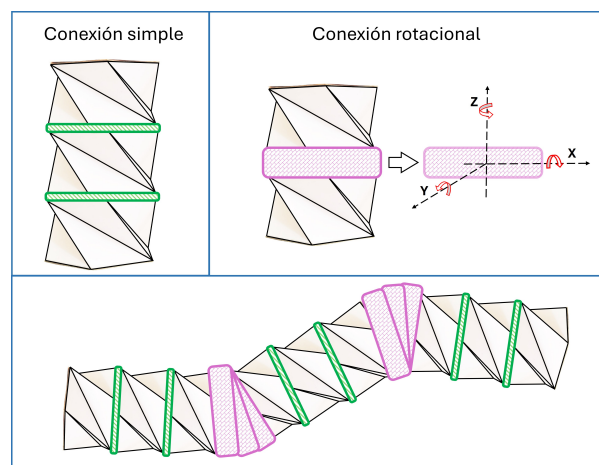


Figura 1: Propuesta de conexión de módulos. Conectores simples y de rotación para unir módulos.

Este trabajo está distribuido en cinco secciones. La primera es una sección introductoria. La Sección 2 presenta el diseño mecánico del prototipo y la Sección 3 revisa las ecuaciones cinemáticas para el control de movimiento del conector rotacional. Por otro lado, la Sección 4 presenta los resultados experimentales que validan esta propuesta, y finalmente en la Sección 5 se subrayan las principales conclusiones del trabajo.

2. Diseño del prototipo

El prototipo que se propone para este trabajo se basa en los modelos de cuello Mena et al. (2020) y brazo Nagua et al. (2021) flexibles accionados mediante tendones y un eslabón blando, desarrollados en el grupo de investigación de robótica blanda del RoboticsLab. Ambos modelos utilizan tres motores para controlar 2 GDL.

El diseño geométrico del brazo se propone para la creación de una articulación flexible para conectar los módulos de origami. La principal diferencia entre el diseño de Nagua et al. (2021) y esta propuesta es la disposición del eslabón blando. El brazo está diseñado para tener una posición inicial horizontal, mientras que aquí se utilizará en una configuración vertical con el fin de minimizar los efectos de la gravedad.

El eslabón blando es el componente principal de esta articulación. Es un eslabón con una base triangular de 30mm de lado que forma un prisma asimétrico, como se muestra en la Figura 2, proporcionando así un ángulo de bloqueo variable en toda la articulación. Tiene tres orificios en cada uno de los vértices, separados 120°, a través de los cuales pasan los tendones.

La articulación consta de tres eslabones, como se muestra en la Figura 2 (derecha), cada uno con una altura de 15mm, obteniendo una altura total de 45mm. El ángulo de bloqueo de la articulación varía entre 50° y 100°, dependiendo de la zona de deformación. Cuando los vértices del triángulo se juntan, la articulación alcanzará una inclinación máxima de 50°, mientras que al juntar los bordes del triángulo, se alcanzará una inclinación máxima de 100°.

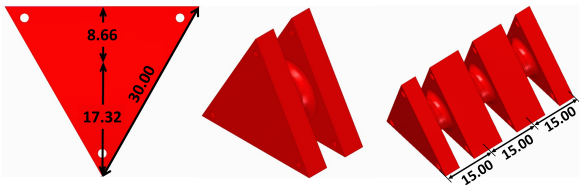


Figura 2: Conector de articulación flexible, diseño del eslabón principal. Triángulo principal con medidas del diseño (izquierda), eslabón principal (centro), y tres eslabones que conforman la articulación (derecha).

El eslabón blando requiere de dos bases para formar el prototipo: una base superior y otra inferior. El prototipo de eslabón utiliza bases hexagonales para la conexión a los módulos de origami. Ambas bases tienen una extrusión triangular en el centro que coincide con las dimensiones del eslabón blando y los orificios correspondientes para los tendones. La base inferior tiene orificios para conectar el eslabón a los actuadores, mientras que la base superior contiene los orificios correspondientes a las bases hexagonales del módulo de origami (Figura 3). Tres micromotores de corriente continua, actuarán sobre los tendones. Por lo tanto, es necesaria una base para fijar los motores con sus correspondientes poleas para el accionamiento de los tendones. Los motores y las poleas se alinean con cada tendón que atraviesa el eslabón.

Las piezas del prototipo se imprimieron en 3D, con el eslabón blando fabricado en TPU NinjaFlex 85A y el resto de piezas en filamento PLA. El montaje se completa con tornillos de métrica M2. La Figura 3 muestra el prototipo completamente montado.

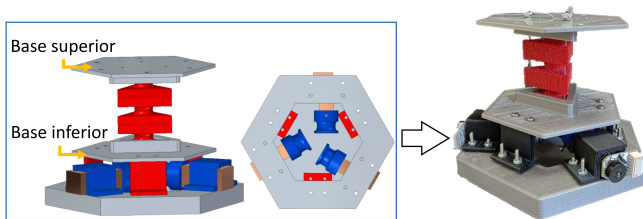


Figura 3: Prototipo de conector flexible. Diseño CAD de los componentes totalmente ensamblados y prototipo real.

El hardware utilizado para implementar el prototipo consiste en una placa Raspberry Pi 3B+ como controlador del

sistema, tres micromotores DC y tres controladores de puente H TB6612FNG. La Tabla 1 proporciona la distribución detallada de los pines utilizados. El funcionamiento del prototipo se programa en lenguaje C++ utilizando la IDE Qt Creator.

Tabla 1: Pines utilizados desde Raspberry Pi para controlar la articulación blanda.

Pin	Pin Mode	Funcionalidad	Motor
40	OUTPUT	AIN1 - Dirección rotación	1
38	OUTPUT	ENCB1 - Encoder pin B	1
37	OUTPUT	AIN2 - Dirección rotación	1
36	INPUT	ENCA1 - Encoder pin A	1
35	OUTPUT	PWM - Señal PWM motor	1
33	OUTPUT	PWM - Señal PWM motor	3
32	OUTPUT	PWM - Señal PWM motor	2
31	OUTPUT	STBY1 - Desactivar rotación	1
29	INPUT	ENCA3 - Encoder pin A	3
22	INPUT	ENCB3 - Encoder pin B	3
19	OUTPUT	STBY3 - Desactivar rotación	3
18	INPUT	ENCB2 - Encoder pin B	2
16	OUTPUT	BIN2 - Dirección rotación	2
15	OUTPUT	BIN1 - Dirección rotación	2
13	INPUT	ENCA2 - Encoder pin A	2
12	OUTPUT	AIN23 - Dirección rotación	3
11	OUTPUT	AIN13 - Dirección rotación	3
10	OUTPUT	STBY2 - Desactivar rotación	2

3. Cinemática del prototipo

La articulación blanda tiene 2 GDL: cabeceo (Pitch) y balanceo (Roll), que se consiguen a través de tres tendones. El cabeceo representa el ángulo de inclinación de la curvatura del eslabón y el balanceo corresponde a la orientación en el plano perpendicular a la base. La orientación se considera nula cuando está alineada con el eje Y. Los tendones están alineados respecto a los vértices del triángulo del eslabón con la siguiente asignación: el tendón 1 corresponde a v_1 , el tendón 2 a v_2 , y el tendón 3 a v_3 , según las ecuaciones (1), (2), y (3), respectivamente. Esta distribución se muestra en la Figura 4 (izquierda).

$$v_1 = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{7\pi}{6} \quad (2)$$

$$v_3 = \frac{11\pi}{6} \quad (3)$$

$$L_i = L - \theta \cdot a \cdot \cos(\Phi_i) \quad (4)$$

$$\Phi_i = v_i - \psi \quad (5)$$

La cinemática inversa del diseño se utiliza para calcular los ángulos de inclinación (θ) y orientación (ψ) del eslabón flexible alcanzados a través de las longitudes de cada tendón: $L_i = [L_1 L_2 L_3]'$. Los tendones pasan por los vértices del eslabón flexible, proyectando su curvatura y permitiendo

una flexión continua. La ecuación (4) presenta la relación cinemática entre los ángulos de inclinación y orientación y la longitud de los tendones. La distancia del centro de la articulación a cada tendón se representa por a y la longitud de la articulación por L . El análisis morfológico da como resultado los valores constantes de $a = 0,017m$ y $L = 0,045m$, como se muestra en la Figura 4. El ángulo entre la orientación y la posición del tendón i se representa por Φ_i en la ecuación (5).

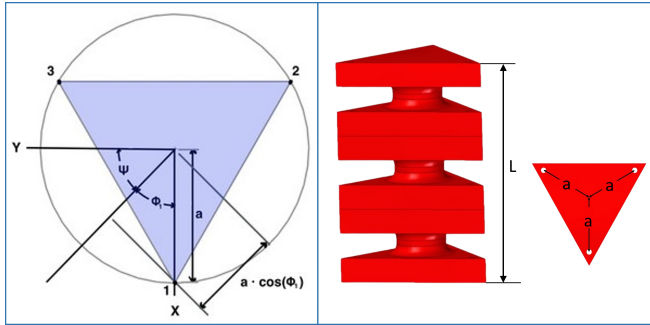


Figura 4: Cinemática inversa del conector flexible. Distribución geométrica de los tendones y parámetros a y L del conector flexible.

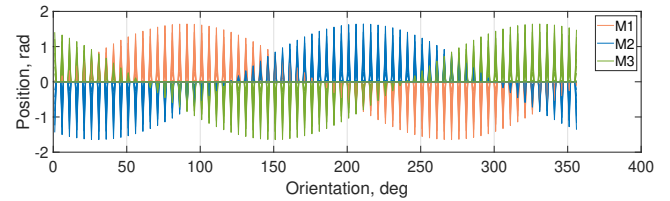
4. Pruebas y resultados

El prototipo consigue posiciones de inclinación y orientación en función de la longitud de los tendones calculada por la cinemática inversa. Los valores requeridos son: longitud inicial del eslabón $L = 45mm$, distancia al centro del triángulo $a = 17mm$ y radio de la polea del motor $r = 6,5mm$.

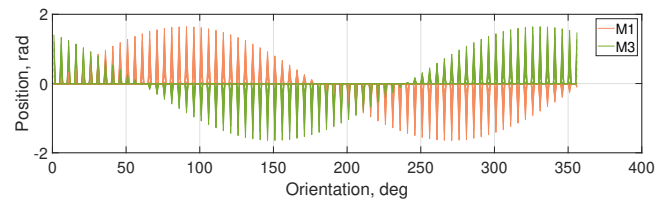
Las pruebas iniciales de posicionamiento de la articulación flexible, arrojaron resultados no esperados debido a que los tres motores no fueron capaces de funcionar simultáneamente y alcanzar las consignas asignadas, obteniendo una deformación del eslabón no adecuada. Tras analizar las posibles causas de este comportamiento, se descubrió que la placa Raspberry Pi sólo dispone de dos canales PWM (modulación por ancho de pulso), a pesar de contar con cuatro pines PWM de hardware. Los canales controlan el rango y el ancho de pulso de la señal para los pines PWM. En esta placa, cada canal controla dos pines PWM. Por lo tanto, si se envía una señal a un pin, el otro pin que comparte el mismo canal recibirá la misma señal. Los pines que comparten canal son 18 y 12 por un lado, y 13 y 19 por el otro. En este caso, los motores M1 y M3 comparten un canal, mientras que el motor M2 funciona de forma independiente. Para conseguir el resultado deseado, la solución propuesta consiste en alternar la activación y desactivación de los motores M1 y M3. De este modo se garantiza un funcionamiento consecutivo fuera de fase, en lugar de simultáneo. Como resultado, el motor M1 funcionará, seguido de la desactivación de su controlador y, a continuación, se activará el controlador del motor M3 para una operación independiente de M1. Esto permite que el motor M2 funcione simultáneamente con cualquiera de los motores M1 o M3, ya que no comparten canal.

Para poner en práctica esta solución, se ha estudiado la posición cinemática de los motores con respecto a su orientación. Si los motores M1 y M3 realizan la misma acción, como recoger o soltar el tendón, no se puede ejecutar el movimiento. La Figura 5(a) ilustra las zonas en las que cada motor recoge

o suelta el tendón, dependiendo de su orientación. Estos gráficos, obtenidos con MATLAB, consideran que los tres motores actúan en paralelo, se tiene en el eje Y las posiciones correspondientes a la longitud de los tendones en valores de posición de cada motor en rad , y en el eje X se ilustran los ángulos correspondientes a la orientación de la articulación correspondiente a cada posición de los motores. Como resultado, todos los motores recogen el tendón en valores positivos y lo liberan en valores negativos. La Figura 5(b) muestra el comportamiento de los motores afectados, M1 y M3, y las zonas en las que ambos motores actúan y realizan la misma acción.



(a)



(b)

Figura 5: Posición cinemática del motor en relación con la orientación. (a) Valores de posición de los motores M1, M2 y M3. (b) Valores de posición de los motores M1 y M3.

Las orientaciones para las que los dos motores recogen la longitud del tendón están comprendidas entre 0° y 60° . Por el contrario, las orientaciones para las que ambos motores liberan el tendón están comprendidas entre 180° y 240° . La articulación flexible está limitada en su funcionamiento, lo que da lugar a zonas no funcionales para determinadas orientaciones. Los rangos de movimiento permitidos entre 60° y 180° se denominarán Zona 1, y los rangos entre 240° y 360° , Zona 2.

Se realizan pruebas en cada zona operativa teniendo en cuenta las restricciones. En ambos casos, el movimiento controlado de los motores llevará a la articulación a la posición deseada y la devolverá a la posición de reposo. El funcionamiento en ambas zonas se realiza activando y desactivando los motores en el siguiente orden para alcanzar las posiciones asignadas:

1. Activar el motor que debe liberar el tendón.
2. Alcanzar la posición deseada correspondiente.
3. Desactivar el motor.
4. Activar el motor que debe recoger el tendón.
5. Alcanzar la posición objetivo correspondiente.

Para volver a la posición inicial se sigue la misma secuencia. Es importante destacar que este comportamiento lo realizan los motores M1 y M3, que se encuentran en conflicto, mientras que el motor M2 funcionará sin ninguna limitación.

En la Figura 6 se presentan los resultados de la prueba en la Zona 1, con una orientación de 100° y una inclinación

de 30°. Es evidente que los motores M1 y M2 funcionan simultáneamente, a pesar de realizar acciones diferentes. El motor M2 funcionará siempre con el motor que recoge el tendón.

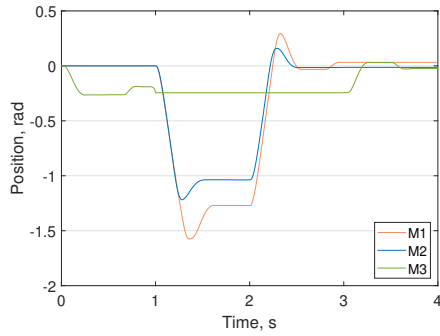


Figura 6: Funcionamiento del conector blando en la Zona 1. Posiciones de los motores M1, M2 y M3 para una orientación de 100° y una inclinación de 30°.

La Figura 7 presenta los resultados de la prueba realizada en la Zona 2, con una orientación de 250° y una inclinación de 30°. Aquí los motores M3 y M2 funcionan simultáneamente.

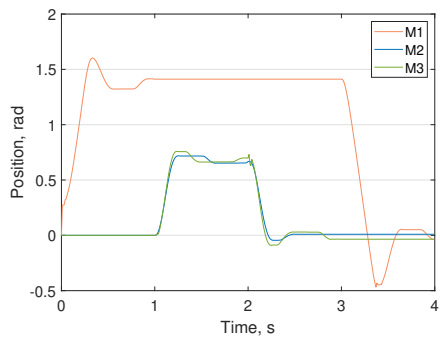


Figura 7: Funcionamiento del conector blando en la Zona 2. Posiciones de los motores M1, M2 y M3 para una orientación de 250° y una inclinación de 30°.

Por último, se diseña una prueba para evaluar la funcionalidad del conector rotacional blando en las distintas zonas, incluida la zona no operativa. La prueba consiste en mover la articulación consecutivamente a través de cinco posiciones diferentes dentro de su espacio de trabajo, con incrementos de orientación de 60° y una inclinación de 30° en todos los casos. En la Tabla 2 se detallan los valores y las zonas de las cinco posiciones objetivo de la prueba. Tras alcanzar cada objetivo, la articulación vuelve a su posición inicial.

Tabla 2: Conector rotacional blando. Consignas de posición para prueba final.

	Roll	Pitch	Zona	M1 (rad)	M2 (rad)	M3 (rad)
1	70°	30°	1	1.28	-1.04	-0.23
2	130°	30°	1	1.04	0.23	-1.28
3	190°	30°	-	-0.23	1.28	-1.04
4	250°	30°	2	-1.28	1.04	0.23
5	310°	30°	2	-1.04	-0.23	1.28

La prueba comienza con una orientación de 70° en la Zona 1, seguida de un movimiento de 130° en la misma zona. Posteriormente, se sugiere una orientación de 190°, durante la cual

la articulación debe permanecer inmóvil (zona sin funcionamiento). Por último, la articulación se desplazará a la Zona 2 con orientaciones de 250° y 310°.

La Figura 8 ilustra los resultados de la prueba. La orientación inicial es de 70°, los motores M1 y M2 permanecen inmóviles mientras M3 libera el tendón. Para volver a la posición inicial, se activan los motores M1 y M2, con M2 recogiendo y M1 soltando el hilo, mientras M3 espera. Del mismo modo, a 130° de orientación, los motores funcionan exactamente igual, salvo que el motor M2 tira y luego suelta el hilo, simultáneamente con M1. A continuación, a 190° de orientación, al aproximarse a la zona no operativa, se ordena a los motores que operen en la Zona 1 con un objetivo de orientación e inclinación de 0°.

Por último, al orientarse a 250° y en la Zona 2, se observa cómo M2 y M3 permanecen inmóviles, mientras M1 libera el tendón, y a continuación M2 y M3 operan, ambos recogiendo sus tendones correspondientes, mientras M1 permanece inmóvil. Para volver a la posición inicial, M2 y M3 liberan el tendón, mientras M1 espera, y luego M1 recoge el tendón, mientras M2 y M3 esperan en la zona inicial. A 310° de orientación, la articulación se comporta de forma similar, con la única diferencia de que el motor M2 libera y luego recoge el hilo, mientras trabaja simultáneamente con el motor M3.

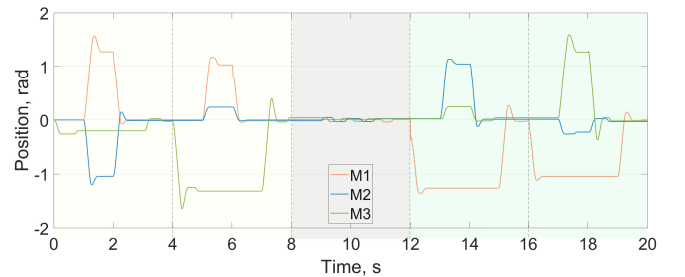


Figura 8: Funcionamiento del conector rotacional blando en todas las zonas considerando cinco consignas de posición. Resultados de posición de los motores M1, M2 y M3 para una inclinación de 30° en todos los casos y orientaciones de 70°, 130°, 190°, 250° y 310°.

El módulo blando basado en origami se fijó al conector rotacional blando para esta prueba final, como se muestra en la figura 9.

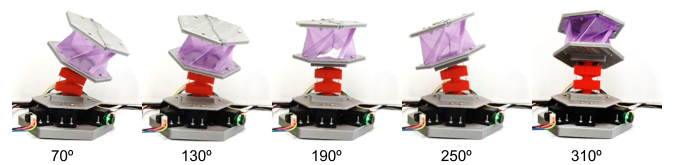


Figura 9: Funcionamiento del conector rotacional blando en conjunto con el módulo blando basado en origami. Inclinación de 30° para todos los casos y orientaciones de 70°, 130°, 190°, 250°, y 310°.

El prototipo ha alcanzado las consignas asignadas en posición, validando de esta manera el correcto funcionamiento de los 2 GDL del conector blando. Además, incluir el módulo de origami en el conector no ha afectado al control del mismo, por tanto se puede concluir que el sistema es robusto para la aplicación diseñada.

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado el diseño de un conector rotacional flexible para cadenas modulares blandas, a través del uso de un eslabón blando de geometría triangular capaz de flexionar en 2 GDL a través del accionamiento de tres tendones conectados a micromotores de corriente continua.

La construcción del prototipo se ha realizado con impresión 3D, con materiales rígidos y flexibles. Los componentes de sujeción se han impreso con PLA (ácido poliláctico), mientras que el eslabón blando con TPU 85A.

La geometría del eslabón blando permite ángulos de bloqueo de flexión distintos, dependiendo de la región. Así, en un movimiento en el sentido de las aristas se tiene el doble de flexión que para un movimiento en el sentido de los vértices (100° y 50°, respectivamente).

El prototipo se ha controlado con una placa Raspberry Pi 3B+. A pesar de sus limitaciones en el número de canales de salidas PWM, se ha propuesto una solución de activación por zonas para el funcionamiento adecuado del accionamiento de los motores que permite alcanzar las consignas de posición de la articulación.

Se han realizado pruebas de validación en cada una de las zonas de forma individual y una prueba final donde se cubre el espacio de trabajo completo del prototipo, demostrando el correcto funcionamiento del conector blando con 2 GDL.

Dado que este trabajo ha realizado la comprobación del correcto funcionamiento del conector por medio de la información arrojada por los encoders de posición de los motores, se propone como trabajo futuro la implementación de un lazo de control que incluya el posicionamiento angular real de la estructura blanda, para lo cual será necesario añadir un sensor inercial en la base superior del conector.

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 financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033, y del proyecto ADAPTA: Flexibilización en la robótica industrial: Aplicación de tecnologías de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para factorías con alta capacidad de adaptación y resiliencia, con referencia PLEC2023-010218, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

Ahmadzadeh, H., Masehian, E., Asadpour, M., 2016. Modular robotic systems: characteristics and applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 81 (3-4), 317–357.

Davey, J., Kwok, N., Yim, M., 2012. Emulating self-reconfigurable robots: design of the smores system. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 4464–4469.

Donald, B. R., Levey, C. G., McGray, C. D., Paprotny, I., Rus, D., 2006. An untethered, electrostatic, globally controllable mems micro-robot. *Journal of microelectromechanical systems* 15 (1), 1–15.

Drotman, D., Jadhav, S., Karimi, M., de Zonia, P., Tolley, M. T., 2017. 3d printed soft actuators for a legged robot capable of navigating unstructured terrain. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 5532–5538.

Fukuda, T., Nakagawa, S., 1988. Approach to the dynamically reconfigurable robotic system. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 1 (1), 55–72.

Galloway, K. C., Jois, R., Yim, M., 2010. Factory floor: A robotically reconfigurable construction platform. In: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 2467–2472.

Germann, J., Dommer, M., Pericet-Camara, R., Floreano, D., 2012. Active connection mechanism for soft modular robots. *Advanced Robotics* 26 (7), 785–798.

Gu, H., Möckli, M., Ehmke, C., Kim, M., Wieland, M., Moser, S., Bechinger, C., Boehler, Q., Nelson, B. J., 2023. Self-folding soft-robotic chains with reconfigurable shapes and functionalities. *Nature Communications* 14 (1), 1263.

Homberg, B. S., Katzschmann, R. K., Dogar, M. R., Rus, D., 2015. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper. In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 1698–1705.

Jiao, Z., Zhang, C., Wang, W., Pan, M., Yang, H., Zou, J., 2019. Advanced artificial muscle for flexible material-based reconfigurable soft robots. *Advanced Science* 6 (21), 1901371.

Kurumaya, S., Phillips, B. T., Becker, K. P., Rosen, M. H., Gruber, D. F., Galloway, K. C., Suzumori, K., Wood, R. J., 2018. A modular soft robotic wrist for underwater manipulation. *Soft robotics* 5 (4), 399–409.

Lee, J.-Y., Cho, K.-J., 2017. Development of magnet connection of modular units for soft robotics. In: 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, pp. 65–67.

Mena, L., Gil, D., Monje, C. A., Martínez de la Casa, S., 2022. Diseño de una articulación de dos grados de libertad para robots modulares. In: XLIII Jornadas de Automática. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, pp. 743–748.

Mena, L., Monje, C. A., Nagua, L., Muñoz, J., Balaguer, C., 2020. Test bench for evaluation of a soft robotic link. *Frontiers in Robotics and AI* 7, 27.

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.

Nagua, L., Relaño, C., Monje, C. A., Balaguer, C., 2021. A new approach of soft joint based on a cable-driven parallel mechanism for robotic applications. *Mathematics* 9 (13), 1468.

Phillips, B. T., Becker, K. P., Kurumaya, S., Galloway, K. C., Whittredge, G., Vogt, D. M., Teeple, C. B., Rosen, M. H., Pieribone, V. A., Gruber, D. F., et al., 2018. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration. *Scientific reports* 8 (1), 14779.

Qin, Y., Wan, Z., Sun, Y., Skorina, E. H., Luo, M., Onal, C. D., 2018. Design, fabrication and experimental analysis of a 3-d soft robotic snake. In: 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, pp. 77–82.

Rafsanjani, A., Zhang, Y., Liu, B., Rubinstein, S. M., Bertoldi, K., 2018. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Science Robotics* 3 (15), eaar7555.

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

Romanishin, J. W., Gilpin, K., Rus, D., 2013. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 4288–4295.

Sayed, M. E., Roberts, J. O., McKenzie, R. M., Aracri, S., Buchoux, A., Stokes, A. A., 2021. Limpet ii: A modular, untethered soft robot. *Soft Robotics* 8 (3), 319–339.

Schmitz, D., 1988. The cmu reconfigurable modular manipulator system. In: Tech, Report The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pa.

Wang, L., Iida, F., 2012. Towards “soft” self-reconfigurable robots. In: 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). IEEE, pp. 593–598.

Wolfe, K. C., Moses, M. S., Kutzer, M. D., Chirikjian, G. S., 2012. M 3 express: a low-cost independently-mobile reconfigurable modular robot. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 2704–2710.

Yim, M., 1993. A reconfigurable modular robot with multiple modes of locomotion. In: Proc. of the 1993 JSME Conference on Advanced Mechatronics, Tokyo, Japan.

Zou, J., Lin, Y., Ji, C., Yang, H., 2018. A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion. *Soft robotics* 5 (2), 164–174.