

Jornadas de Automática

Rediseño y validación de un encapsulado estanco para un nuevo actuador híbrido subacuático

Javier Chinchilla-Pastor^a, Manuel Herraiz-Sala^a, Fco. Javier Miñano^a, Julián Girona-Mora^a, Andrea Blanco-Ivorra^{a,b}, Nicolas García-Aracil^a

^a Grupo de Robótica e Inteligencia Artificial, Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Av. de la Universidad, s/n. 03202 Elche, España

^b Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica, Universidad Miguel Hernández, Av. de la Universidad, s/n. 03202 Elche, España.

To cite this article: Chinchilla-Pastor, J, Herraiz-Sala, M, Miñano, F.J, Girona-Mora, J, Blanco-Ivorra, A, García-Aracil, N. 2026. Redesign and validation of a watertight housing for a new hybrid underwater actuator. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13788>

Resumen

Lesiones del sistema nervioso central como los accidentes cerebrovasculares tienen una gran repercusión en la autonomía de las personas ya que provocan trastornos motores como la espasticidad, limitando y condicionando la calidad de vida de las personas que lo padecen. En los últimos años se ha trabajado en el proyecto NOHA, investigando en un nuevo paradigma de rehabilitación robótico-acuática que combina la robótica tradicional con los beneficios de la hidroterapia. En las últimas pruebas llevadas a cabo se detectaron ciertos problemas en la estanqueidad del encapsulado fabricado, que pretenden solucionarse en este artículo. A continuación, se presentan los resultados del rediseño y validación de la nueva versión del sistema, que sugieren mejores prestaciones en términos de estanqueidad y eficiencia del control posicional PID.

Palabras clave: Mecatrónica, Mecatrónica biomédica, Rehabilitación subacuática, Actuador híbrido

Redesign and validation of a watertight housing for a new hybrid underwater actuator

Abstract

Injuries to the central nervous system, such as strokes, have a significant impact on people's independence, as they cause motor disorders such as spasticity, thereby limiting and affecting the quality of life of those affected. In recent years, work has been carried out on the NOHA project, investigating a new paradigm of robotic-aquatic rehabilitation that combines traditional robotics with the benefits of hydrotherapy. In the latest tests carried out, certain issues were identified regarding the watertightness of the manufactured enclosure, which this article aims to resolve. The results of the redesign and validation of the new version is presented below, suggesting improved performance in terms of watertightness and the efficiency of the PID positional control.

Key words: Mechatronics, Biomedical mechatronics, Underwater rehabilitation, Hybrid actuator.

1. Introducción

Las patologías neurológicas tales como los accidentes cerebrovasculares (ACV), neuropatías periféricas o esclerosis múltiple producen graves trastornos motores que derivan en discapacidad crónica, limitando de este modo la autonomía y la calidad de vida de miles de personas.

Una de las principales consecuencias de estas patologías es la espasticidad muscular en los usuarios siendo el principal impedimento para realizar una correcta rehabilitación debido a dolores y molestias en los pacientes durante las sesiones (Kobeissy 2015).

A pesar de que la terapia convencional se ha visto reforzada por el desarrollo de la robótica de rehabilitación (Roby-Brami et al. 2021); (Mirelman et al. 2009); (Brütsch et al. 2011), un

porcentaje elevado de pacientes queda excluido de estas terapias asistidas por robots debido a problemas de espasticidad, el dolor y las contracturas articulares, que dificultan la adaptación de los sistemas robóticos tradicionales y la realización de sesiones terapéuticas adecuadas (Pereira et al., 2012).

Por otra parte, la terapia acuática ha demostrado ser beneficiosa para diversos trastornos, ofreciendo ventajas clave como la relajación muscular, la ingravidez y la descarga articular, demostrando su eficacia en el tratamiento de algunos trastornos (Kesiktaş et al., 2004; Roper et al., 2013).

Bajo este contexto surge el proyecto NOHA con el objetivo principal de diseñar una articulación que emplea un sistema de actuación híbrida compuesta por un pequeño motor eléctrico y unos jets que utilizan la propulsión del agua del medio acuático en el que se encuentran para llevar a cabo el movimiento articular (E. Belmonte et al., 2023), (García-Pérez, J.V et al., 2023), (Herraiz-Sala, M et al., 2025). El uso de los jets permite un movimiento articular más suave y seguro para el paciente a diferencia del uso de actuadores neumáticos (Heo et al., 2020).

En el presente trabajo se indaga en la búsqueda de mejoras mecánicas en el sistema de actuación híbrida tratando de conseguir un encapsulado estanco, de menores dimensiones y con menor resistencia al giro.

2. Materiales y métodos

2.1. Antecedentes

El presente proyecto surge con la finalidad de desarrollar la patente internacional WO 2024/089313 A1.

En cuanto al diseño mecánico, una primera versión diseñada cuenta con la estructura mostrada en la Figura 1. En esta primera versión se trata de conseguir la estanqueidad mediante el uso de una junta tórica (O-ring), una junta de labio simple o retén y un sello mecánico cerámico.

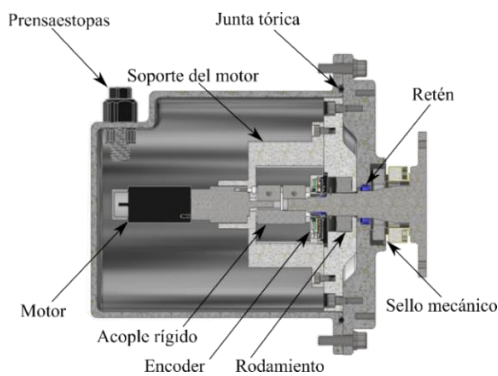


Figura 1: Primera versión de la carcasa.

Con el diseño mostrado en la Figura 1 se realizaron una serie de pruebas de estanqueidad en estático y en dinámico. Mientras que al sumergir la carcasa sin hacer girar el eje el interior de esta permanecía seco, cuando se llevaba a cabo el movimiento del eje para simular el funcionamiento real de la articulación, se observaron filtraciones de agua en algunos de los ensayos.

Analizando las posibles causas de esta problemática se observó, por un lado, que el conjunto está apoyado por un único punto, el rodamiento. Esta distribución genera que el conjunto del motor, el soporte del motor, el acoplamiento rígido y el encoder queden completamente en voladizo generando un desalineamiento del eje con el orificio de la carcasa haciendo que el sello mecánico y el retén no funcionen adecuadamente.

Por otro lado, a la hora de implementar el encapsulado en la articulación del exoesqueleto, se genera una fuerza puntual en el extremo de la brida del eje debida al peso del paciente, generando una inestabilidad en la estructura y dificultando el correcto funcionamiento de los elementos de estanqueidad.

En la Figura 2 se aprecian las fuerzas distribuidas generadas por estos elementos representando el efecto que tienen estos voladizos en la estabilidad y la alineación del conjunto. En color rojo se representa la fuerza distribuida generada por los elementos en voladizo como el motor, el soporte del motor y el acople rígido mientras que en azul queda representada la carga distribuida debida al peso del eje y el sello mecánico.

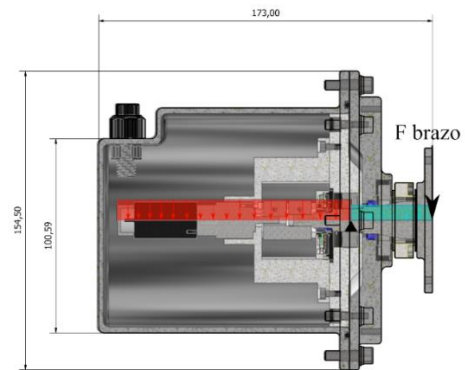


Figura 2: Distribución de fuerzas en el interior del conjunto.

Otra problemática es el volumen de agua desplazado por la carcasa al sumergirse, generando con ello una fuerza de flotación que, sumado a los problemas de fricción generados por los elementos de estanqueidad, dificulta el control. Por ello se han reducido las dimensiones del encapsulado.

2.2. Rediseño del encapsulado.

En la segunda versión se ha rediseñado el encapsulado para tratar de solventar los posibles fallos observados en la versión anterior. En la Figura 3 se muestra el nuevo diseño del encapsulado con todas sus partes relevantes.

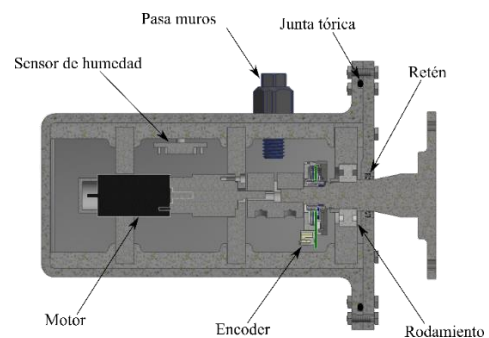


Figura 3: Nueva versión de la carcasa.

Por un lado, la primera modificación ha sido apoyar en varios puntos el conjunto para disminuir la desalineación con el eje y de esta forma facilitar el correcto funcionamiento de los elementos encargados de la estanqueidad. En la Figura 4 se muestra la distribución de cargas con esta nueva configuración haciendo visual la relevancia de añadir apoyos disminuyendo así las zonas en voladizo. En color rojo se representa toda la carga de los elementos debidamente apoyados y en color azul la fuerza correspondiente a la parte del eje que se encuentra en voladizo.

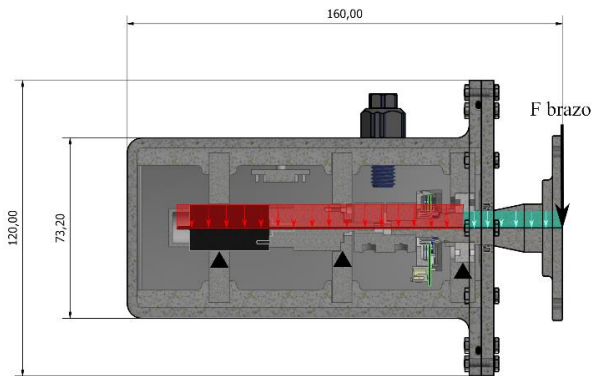


Figura 4: Nueva distribución de apoyos.

Gracias a esta redistribución de los apoyos, tanto el eje del motor como el eje bridado trabajan correctamente alineados, haciendo posible eliminar el sello mecánico de la configuración y reduciendo así la fricción que este generaba.

Además, se ha redimensionado el encapsulado para solventar los problemas de flotabilidad debidos a las dimensiones. Al comparar la Figura 3 con la Figura 4 se observa una reducción en las dimensiones del encapsulado, la longitud disminuye de 173mm a 160mm, mientras que el ancho se reduce de 154,5mm a 120mm. Según el principio de Arquímedes, la fuerza ascendente ejercida por el fluido sobre un cuerpo total o parcialmente sumergido es equivalente al peso del volumen del fluido desalojado por dicho cuerpo. Matemáticamente, este fenómeno se rige por la ecuación (1):

$$E = \rho_{\text{fluido}} \cdot g \cdot V_s \quad (1)$$

Asumiendo que ambas carcasas se sumergen en el mismo fluido y se ven afectadas por la misma constante gravitatoria, vemos como el empuje es directamente proporcional al volumen sumergido.

Por un lado, el volumen desplazado de la versión 1 es de 1351,2 cm³ mientras que el volumen desplazado por la segunda versión es de 857,892 cm³ haciendo de esta manera que el empuje sufrido en la segunda carcasa represente un 63,5% del generado por la carcasa 1 ($E_2 < E_1$).

3. Pruebas de validación de la nueva versión del encapsulado

Para comprobar que la carcasa es estanca se ha instalado un sensor de humedad DHT22 y se han realizado diferentes pruebas, de menos a más demandantes para el conjunto, que se describirán a continuación. En la Figura 5 se muestra el

montaje experimental del sensor colocado en el chasis que va embutido en el interior de la carcasa.

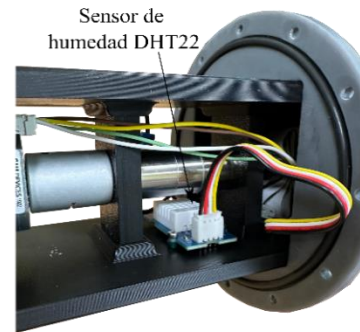


Figura 5: Montaje del sensor DHT22.

Se han realizado 3 pruebas diferentes para evaluar la estanqueidad de los encapsulados. Todas ellas de la misma duración, 1800 segundos y del mismo modo, haciendo girar el eje de forma oscilatoria recorriendo un rango de 180° con una entrada senoidal, simulando la extensión y la flexión del codo, añadiendo además una pala en su extremo para generar un par de torsión que simule una situación desfavorable en la alineación de los elementos encargados de lograr la estanqueidad.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sensor y validar así los datos recogidos por el mismo, se ha instalado el DHT22 dentro de la carcasa en ausencia del resto de componentes electrónicos y se ha introducido agua gradualmente para comprobar su correcto funcionamiento.

Respecto a las pruebas, se ha realizado una primera prueba en un entorno seco con el encapsulado cerrado para ver el comportamiento del sensor en el interior de la carcasa en un entorno sin filtraciones de agua.

Una segunda prueba se realiza sumergiendo el encapsulado de la primera versión en el agua haciendo girar el motor para mover la pala.

Por último, en una tercera prueba se sumerge el encapsulado rediseñado haciéndolo girar de igual modo que en la prueba 3. En la Figura 6 y en la Figura 7 se muestran dos imágenes representativas de los montajes empleados durante las pruebas acuáticas tanto con la antigua versión como con la versión rediseñada del encapsulado.



Figura 6: Nueva versión de la carcasa con la pala.

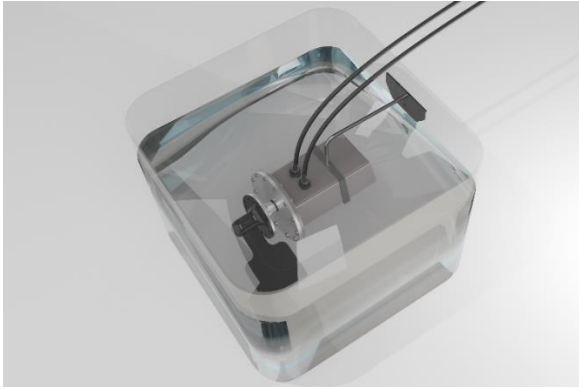


Figura 7: Render de todo el conjunto durante la prueba sumergida para facilitar visualizar el montaje.

4. Resultados y discusión

A la hora de interpretar los datos se tendrá en cuenta, por un lado, los valores de humedad registrados por el sensor DHT22, y, por otro lado, los valores de posición objetivo frente a la posición alcanzada pudiendo así justificar las mejoras tanto en estanqueidad como en fricciones debidas a conceptos mecánicos.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados del gráfico de posición, superponiendo la gráfica de la posición objetivo frente a la posición real obtenida para de este modo hacer visibles las mejoras obtenidas respecto al control.

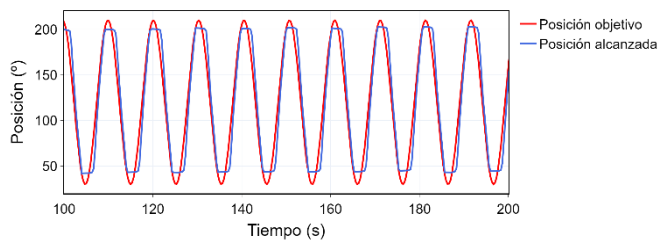


Figura 8: Posición objetivo frente a posición alcanzada con la primera versión del encapsulado.

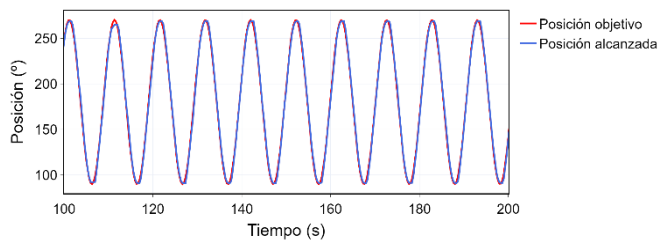


Figura 9: Posición objetivo frente a posición alcanzada con el nuevo encapsulado.

En la Tabla 1 quedan recogidos los valores de posición objetivo, posición real obtenida y el desfase entre ellas.

Tabla 1: Resultados de las pruebas.

Prueba	Posición objetivo	Posición alcanzada	Desfase
V1	30°-210°	42°-200°	12°- 10°
V2	90°-270°	91°-268,8°	1°- 1,2°

Por otro lado, en la Figura 10, se muestra el aumento gradual de la humedad cuando entra agua en la carcasa aumentando alrededor de un 20%. De esta forma queda demostrado el correcto funcionamiento del sensor.

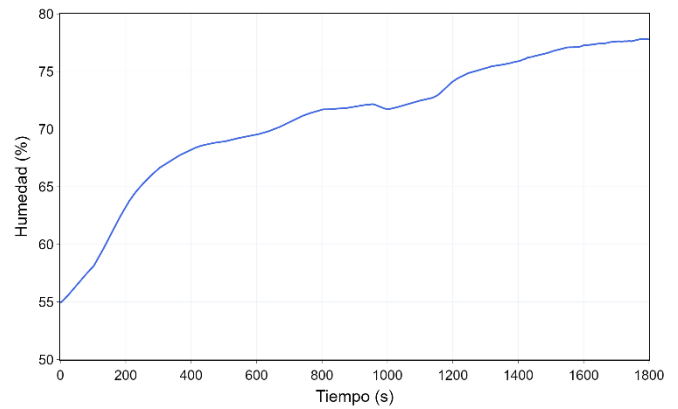


Figura 10: Análisis de la humedad añadiendo gradualmente agua dentro de la carcasa.

Respecto a la experimentación, en la Figura 11 quedan recogidos todos los resultados de manera superpuesta para apreciar las diferencias entre ellos. En color azul se grafican los resultados correspondientes a la prueba en seco, haciendo visible como la humedad disminuye gradualmente al estar fuera del agua demostrando como al estar en un entorno seco el sensor de humedad trabaja correctamente. El descenso de humedad en las medidas está justificado por el aumento de temperatura que genera el motor en el interior del encapsulado.

En color naranja se grafican los datos correspondientes a la prueba sumergida con la versión 1 apreciándose el aumento de un 6% de la humedad. De esta forma queda reflejado como no se cumple rigurosamente con la estanqueidad.

Por último, en color verde quedan recogidos los datos correspondientes a las pruebas de estanqueidad con la segunda versión, demostrando como esta se mantiene constante durante toda la duración de la prueba.

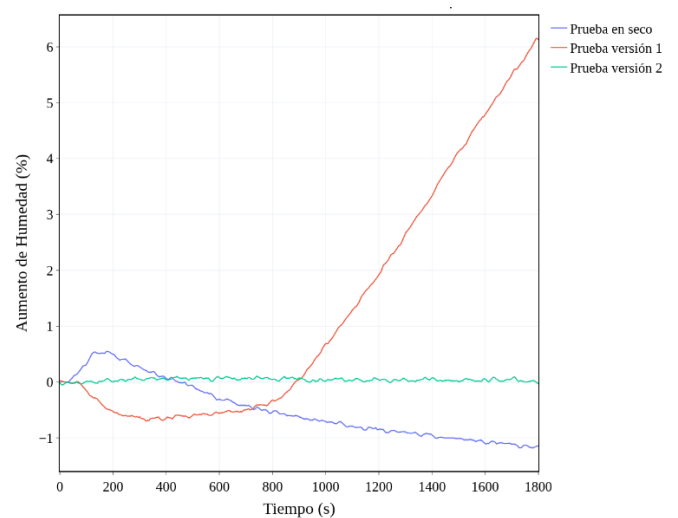


Figura 11: Resultados de las pruebas del análisis de humedad.

En la tabla 2 quedan recogidos los datos de la humedad registrados por el sensor.

Tabla 2: Resultados de las pruebas del análisis de la humedad.

Prueba	Humedad inicial	Humedad final	Incremento de humedad
Seco	56,83%	55,33%	-1,5%
Versión 1	56,45%	62,74%	6,29%
Versión 2	61,19%	61,22%	0,03%

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas, se ha demostrado como la correcta alineación del sistema y la eliminación del sello mecánico han disminuido la fricción del eje. Esta reducción de las fuerzas de roce ha mejorado la precisión posicional bajo el mismo lazo de control PID, disminuyendo el error de posición de 12° a 1° .

Por otro lado, a partir de los resultados de humedad obtenidos, se concluye que la reconfiguración de los apoyos estructurales ha mejorado el desempeño de los elementos de estanqueidad, permitiendo prescindir del sello mecánico registrando una notable mejora en la estabilidad del sistema, reduciendo la fluctuación de humedad desde un 6,29 % en la primera versión a un 0,2 % en la nueva versión.

5. Conclusión

En este trabajo se ha presentado el rediseño y la validación de un encapsulado estanco para un actuador híbrido, logrando solventar las limitaciones mecánicas de la primera versión.

La reconfiguración estructural mediante múltiples puntos de apoyo eliminó el voladizo del eje, garantizando una alineación concéntrica óptima. Esto no solo optimizó el desempeño de los elementos de estanqueidad, permitiendo prescindir del sello mecánico cerámico, sino que redujo drásticamente las fuerzas de fricción. Como consecuencia, bajo el mismo lazo de control PID, el error de posicionamiento disminuyó de 12° a tan solo 1° .

Como trabajos futuros se contempla la idea de implementar este nuevo encapsulado en la articulación de un exoesqueleto subacuático, abriendo así una nueva ventana de investigación y desarrollo de estos dispositivos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por Agencia Estatal de Investigación, la Unión Europea-Next Generation EU y Generalitat Valenciana a través de los proyectos CIPROM/2022/12 y PID2022-139957OB-I00.

6. Referencias

- Brütsch, K., Koenig, A., Zimmerli, L., Méritat-Koenke, S., Riener, R., Jäncke, L., van Hedel, H. J., Meyer-Heim, A., 2011. Virtual reality for enhancement of robot-assisted gait training in children with neurological gait disorders. *Journal of rehabilitation medicine* 43 (6), 493–499. DOI: 10.2340/16501977-0802
- Belmonte-Cerdán, E., J. V. García-Pérez, Martínez-Pascual, D.^a, J. Álvarez-Pastor, A. Blanco-Ivorra, J. M. Catalán, N. García-Aracil, 2023. Diseño de un actuador híbrido para rehabilitación acuática.
- Mirelman, A., Bonato, P., Deutsch, J. E., 2009. Effects of training with a robot-virtual reality system compared with a robot alone on the gait of individuals after stroke. *Stroke* 40 (1), 169–174. DOI: 10.1161/STROKEAHA.108.516328
- García-Pérez, J.V., Belmonte-Cerdán, E., Álvarez Pastor, J., Blanco-Ivorra, A., Catalán, J.M., García-Aracil, N. Estudio de viabilidad de un nuevo concepto de actuador híbrido para robótica de rehabilitación acuática.
- Herraiz-Sala, M., Peral-Sempere, E., Belmonte-Cerdán, E., Miñano, F.J., Blanco-Ivorra, A., García-Aracil, N., 2025. Evaluación de un actuador híbrido para rehabilitación robótica subacuática.
- Kesiktas, N., Paker, N., Erdogan, N., Gülsen, G., Biçki, D., Yilmaz, H., 2004. The use of hydrotherapy for the management of spasticity. *Neurorehabilitation and neural repair* 18 (4), 268–273.
- Kobeissy, F. H., 2015. Brain neurotrauma: Molecular, neuropsychological, and rehabilitation aspects. *Frontiers in Neuroengineering* 9: 978-1-4665-6598-2.
- Pereira, S., Graham, J. R., Shahabaz, A., Salter, K., Foley, N., Meyer, M., Teasell, R., 2012. Rehabilitation of individuals with severe stroke: Synthesis of best evidence and challenges in implementation. *Topics in Stroke Rehabilitation* 19 (2), 122–131. DOI: 10.1310/tsr1902-122
- Roby-Brami, A., Jarrassé, N., Parry, R., 2021. Impairment and compensation in dexterous upper-limb function after stroke. from the direct consequences of pyramidal tract lesions to behavioral involvement of both upper-limbs in daily activities. *Frontiers in Human Neuroscience* 15. DOI: 10.3389/fnhum.2021.662006
- Roper, J. A., Bressel, E., Tillman, M. D., 2013. Acute aquatic treadmill exercise improves gait and pain in people with knee osteoarthritis. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 94 (3), 419–425.
- Ung Heo, Sangjoon J. Kim, Jung Kim, 2020. Backdrivable and Fully-Portable Pneumatic Back Support Exoskeleton for Lifting Assistance.