

Robótica Suave para Neurorehabilitación: Conceptualización y Caracterización

R. I. Carino-Escobar^{1*}, W. Yao², J. Cantillo-Negrete¹

¹ División de Investigación en Ingeniería Médica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México

² Universidad de Strathclyde, Glasgow, Reino Unido

**ricarino@inr.gob.mx*

Resumen

Los dispositivos de robótica suave pueden incrementar la efectividad de la rehabilitación del miembro superior de pacientes con enfermedad vascular cerebral (EVC). Sin embargo, al ser una rama nueva de la robótica sus características no se identifican fácilmente en el área de la neurorehabilitación, lo cual complica la posibilidad de reconocer las ventajas y desventajas de estos sistemas robóticos en comparación con los robots rígidos. Para identificar las características y conceptualizar estas ventajas y desventajas de la robótica suave, se propuso un cuestionario de diez preguntas, el cual permite categorizar a dispositivos robóticos de miembro superior usando una escala de cero a diez. El cuestionario fue aplicado a robots enfocados a la neurorehabilitación del miembro superior del estado del arte, identificando los diseños basados en robótica rígida con puntuaciones menores a dos puntos de la escala, y a aquellos basados en robótica suave, con puntuaciones mayores de siete; además, permitió identificar diseños con características tanto suaves como rígidas. La confiabilidad del cuestionario se estimó usando una prueba de correlación entre las puntuaciones totales obtenidas por dos evaluadores, la cual fue alta y significativa ($r=.796$, $p=.006$). El cuestionario puede servir como herramienta para mejorar los diseños de robots para neurorehabilitación de pacientes con EVC, al identificar claramente las características de diseño necesarias para la optimización del torque, la adaptabilidad ergonómica, y el control de este tipo de robots.

Palabras clave: Cuestionario, EVC, Miembro Superior, Rehabilitación, Robots.

1. Introducción

La enfermedad vascular cerebral (EVC) generalmente ocasiona una parálisis total o parcial de un lado del cuerpo, restringiendo gravemente la habilidad de los pacientes para realizar actividades de la vida diaria (AVD) [1]. Se estima que en América Latina el número de personas que padecen discapacidad como secuela de una EVC ha aumentado en los últimos 20 años, y se ha identificado que la población en la mayoría de los países de la región, incluido México, requiere de un mayor acceso a tratamientos de rehabilitación enfocados a EVC [2].

La rehabilitación física juega un papel muy importante para la recuperación y mejora de la función motora de los pacientes con EVC. Consiste principalmente en la repetición de movimientos aislados, que pueden ser enfocados en AVD, de esta forma se aprovecha la capacidad de reorganización del tejido neurológico, conocida como neuroplasticidad [3]. La robótica puede proporcionar ejercicios repetitivos para rehabilitación, y se ha observado que los beneficios que aporta a un programa de rehabilitación son: sesiones de terapia más intensas y largas, mecanismos de retroalimentación para amplificar los movimientos, automatización de la terapia específica del paciente basada en el grado de discapacidad motora, y la obtención de mediciones más precisas para investigación de mecanismos de

neuroplasticidad [4]. A pesar de las ventajas planteadas anteriormente, aún existe la necesidad de desarrollar robots más efectivos, mejorando su portabilidad, y su capacidad para promover mecanismos de neuroplasticidad, lo que ayudará a más terapeutas y pacientes a usar estos dispositivos para recrear AVD.

La robótica suave es una rama reciente de la robótica que consiste en diseños cuya estructura y accionar están basados en componentes flexibles, en lugar de elementos rígidos [4]. Gran parte de estos dispositivos están diseñados tomando a sistemas biológicos como inspiración, y tienen el potencial de proporcionar una interacción más segura con la anatomía de los seres humanos [5]. Por esta razón, se plantea su uso en la rehabilitación de miembro superior, aunque la mayoría de los diseños de robótica suave orientados a este fin, aún no han sido probados en ambientes clínicos de rehabilitación [4]. Ya que esta rama de la robótica es aún poco conocida en el área de neurorehabilitación, las características de los robots suaves pueden ser difíciles de diferenciar de los robots rígidos. Esto dificulta la identificación de las ventajas y desventajas de esta tecnología para mejorar los resultados de terapias en pacientes con EVC. Por lo que, es necesaria una metodología que permita categorizar a dispositivos robóticos para neurorehabilitación del miembro superior, en robots suaves o rígidos. Esto permitirá proponer nuevas soluciones para brindar una terapia más cómoda, y segura, a pacientes con EVC, lo cual ha sido especificado por Chu *et al.* como áreas de mejora en el diseño de dispositivos de robótica suave para neurorehabilitación [4]. Al facilitar el diseño de robots que presenten un mayor grado de ergonomía enfocados en neurorehabilitación se podría incrementar la cantidad de pacientes que pueden recibir terapias y con ello mejorar su calidad de vida.

En este trabajo se hace una revisión de la literatura para conceptualizar las características de los robots suaves y, se propone una metodología, en forma de un cuestionario, que permite su identificación. El cuestionario es evaluado usando una muestra de dispositivos robóticos para rehabilitación de miembro superior del estado de arte, los cuales cuentan, en mayor o menor grado, con características de robótica suave y rígida. Finalmente, se establecen las principales ventajas y desventajas de los robots suaves para ser usados en aplicaciones de neurorehabilitación de pacientes con EVC.

2. Metodología

2.1 Revisión bibliográfica y elaboración de cuestionario

Se realizó una búsqueda bibliográfica de los conceptos asociados con robótica suave, para identificar las características más relevantes que permiten discernir entre diseños basados en robótica rígida y aquellos basados en robótica suave. Para ello, se usaron los siguientes términos de búsqueda: “Soft robots review” y “Soft robot for rehabilitation”. La búsqueda se realizó en el idioma inglés, en las bases de datos de BMC, Frontiers, Scencedirect, IEEE Xplore y Springerlink. Después de haber obtenido los resultados de las bases de datos, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión: que fueran artículos científicos de revisión, que tuvieran como tema principal el análisis de robots suaves, y que describieran robots suaves para miembro superior. Se realizó el análisis de los artículos incluidos y una vez identificadas las características correspondientes a diseños de robótica suave, se adaptaron como ítems en forma de preguntas de un cuestionario. El criterio para la formulación de las preguntas fue: que las preguntas fueran cerradas y dicotómicas, es decir, que pudieran ser contestadas con un “SI” o un “NO”, esto con el fin de que fueran de fácil comprensión y evaluación [6], que cada pregunta permita evaluar una característica de robótica suave, siendo asignado un mismo peso a cada una [6], y que todas las preguntas pudieran ser contestadas por los experimentadores, para ello debían de ser identificables sin necesidad de alguna herramienta especializada, por ejemplo, un software.

2.2 Evaluación del cuestionario propuesto

El cuestionario se aplicó a cinco dispositivos enfocados a neurorehabilitación del miembro superior de pacientes con EVC que están basados en robótica rígida y cinco en robótica suave. Para seleccionar los dispositivos evaluados se realizó una segunda revisión del estado del arte en las mismas bases de datos mencionadas en la sección anterior, con los siguientes criterios de inclusión: dispositivos diseñados para el movimiento de alguna articulación de la extremidad superior, es decir, tener al menos un grado de libertad en una unión interfalángica, en la muñeca, antebrazo, o del brazo. Para el caso de dispositivos rígidos, debían de tener elementos rígidos, no debían de ser definidos como robots suaves por sus creadores, además de existir evidencia clínica de la aplicación de estos dispositivos para neurorehabilitación por medio de la publicación de ensayos clínicos. Para el caso de robots suaves deberían de ser identificados por sus creadores como suaves. El criterio de exclusión fue que no fueran dispositivos prostéticos. Los criterios se basan en la propuesta de Chu *et al.* [4].

Los dispositivos de robótica rígida seleccionados fueron: el AMADEO de Tyromotion, un robot capaz de proporcionar movimiento pasivo y activo de flexo-extensión de los dedos de la mano, y probado en diversos ensayos clínicos en pacientes con EVC, teniendo una eficacia equiparable con la terapia convencional [7]. El MIT-Manus que es un robot desarrollado en 1991, con dos grados de libertad activos, que proporciona movimiento pasivo al hombro y brazo, también probado con ensayos clínicos y comercializado actualmente bajo el nombre de inMotionARM [8]. Otro robot rígido similar en su funcionamiento al MIT-Manus es el ARMEO@Spring [9]. El BI-Manu-Track se diferencia de otros dispositivos en que este proporciona pronación-supinación del antebrazo y flexión-extensión de la muñeca de ambas extremidades [10]. Y, finalmente, la órtesis robótica de mano que forma parte del sistema ReHand-BCI, que proporciona movimiento pasivo de flexión-extensión de los dedos de la mano paralizada [11]. Los diseños de robots suaves analizados fueron todos diseñados para flexión-extensión de los dedos de la mano paralizada, y consistieron en: el MR-Glove que tiene actuadores neumáticos [12]. Un robot suave usando actuadores de cables y que puede usar succión como método de sujeción o correas de velcro [13]. El GraspGlove que también usa actuadores de cables [14]. Un robot que usa actuadores hidráulicos [15]. Finalmente, el Exo-Glove PM un diseño de un robot que usa actuadores neumáticos, combinado con una estructura rígida [16]. En la Fig. 1 se pueden observar dos de los diseños evaluados, la órtesis usada en el ReHand-BCI y una implementación de robot suave [11], [13].



Fig. 1. Ejemplos de robot rígido (izquierda) y suave (derecha).

Se realizó una evaluación cuantitativa preliminar de la confiabilidad del cuestionario. Para ello, se proporcionó a dos evaluadores los artículos científicos y videos (cuando estaban disponibles en línea) de cada dispositivo a evaluar, para que los leyeran, analizaran y contestaran el cuestionario en una hoja de Excel. Posteriormente, se obtuvieron los totales de cada dispositivo y se realizó la prueba de correlación de Spearman, entre los puntajes obtenidos al evaluar los 5 diseños de robótica rígida y 5 de robótica suave, por parte de un evaluador, con los puntajes obtenidos por el otro evaluador, como se plantea por Hernández *et al.* [6]. Este análisis se realizó en el paquete estadístico SPSS versión 17.

3. Resultados y Discusión

Se analizaron un total de 6 artículos de revisión que cumplieron con los criterios de inclusión, los cuales se muestran en la Tabla 1 [17]–[22]. En estos artículos se identificaron 10 características de diseño de robótica suave: 1) Manufactura usando impresión 3D; 2) Actuadores basados en diseños de tendones, fluidos, o polímeros electroactivos; 3) Estructura del robot bioinspirada; 4) Actuador compuesto por un polímero; 5) Grados de libertad infinitos; 6) Actuador usa mecanismos como deformaciones de material flexible para generar movimiento; 7) Sensores de posición están incorporados a la estructura del robot y pueden deformarse; 8) El robot puede ajustarse fácilmente al cuerpo, no hay necesidad de tener tallas; 9) Es difícil conocer por medio de instrumentación la posición exacta del actuador; 10) Todos los componentes del robot son situados en la extremidad a rehabilitar.

Tabla 1: Características de robótica suave de acuerdo con la literatura. Se muestra en color verde las características que fueron mencionadas por cada artículo

Autores	Características									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lee <i>et al.</i> , 2017 [17]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Kim <i>et al.</i> , 2013 [18]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Coyle <i>et al.</i> , 2018 [19]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cianchetti <i>et al.</i> , 2018 [20]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Saigo <i>et al.</i> , 2019 [21]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Trivedi <i>et al.</i> , 2008 [22]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

En la Tabla 2 se muestra el cuestionario propuesto para identificar robots suaves en dispositivos enfocados a neurorehabilitación. Cada pregunta con una respuesta de “SI” asignará un punto a la puntuación final, la cual va de cero a diez. Una mayor puntuación indica mayor similitud con un robot suave.

Tabla 2. Cuestionario para categorización de diseños de robótica enfocados a rehabilitación de miembro superior

Pregunta	Ejemplo	SI/NO
1. ¿Fue necesaria una técnica de impresión 3D para construir el dispositivo?	Los mecanismos de actuación del robot no pudieron ser impresos mediante técnicas de manufactura convencional como usando moldes o cortando estructuras metálicas.	
2. ¿El principio de funcionamiento de los actuadores consiste en el movimiento de fluidos, tendones artificiales, o materiales electroactivos?	El robot incorpora en su diseño bombas neumáticas o hidráulicas	
3. ¿La estructura del robot está bioinspirada?	El diseño del robot se asemeja a una mano, con mecanismos que parecen ligamentos y músculos.	
4. ¿El actuador del robot está compuesto principalmente de polímeros?	Los materiales que integran al actuador son polímeros deformables como los elastómeros termoplásticos, o silicón.	
5. ¿El robot tiene grados de libertad que se pueden considerar infinitos?	No se pueden identificar claramente las “articulaciones” del robot al observar su estructura.	
6. ¿El actuador usa deformaciones de su estructura para generar movimiento?	El robot dobla un material flexible que simula ligamentos, con los cuales mueve los dedos de la mano	
7. ¿Los sensores de posición del robot están incorporados a su estructura?	Los sensores son, o son similares, a galgas extensiométricas	
8. ¿El robot se puede ajustar directamente a la extremidad que se desea rehabilitar?	No se necesitan diferentes tamaños o cambiar la estructura para que el robot pueda colocarse en la extremidad	
9. ¿Se tiene incertidumbre sobre la posición exacta del actuador?	No se puede medir con exactitud de al menos un grado, la posición de las articulaciones de la mano que se pretende rehabilitar, usando la estructura del robot.	
10. ¿Todos los componentes del robot son ubicados en la extremidad a rehabilitar?	Los actuadores, sensores de posición, circuito de control y la alimentación son parte de la estructura del robot.	

En la Tabla 3 pueden observarse los resultados de la aplicación del cuestionario a los dispositivos robóticos enfocados en neurorehabilitación del miembro superior, los cuales forman parte del estado del arte. Se puede observar que los robots rígidos, con excepción de la órtesis del sistema ReHand-BCI, no obtuvieron más de dos puntos en la escala del cuestionario. Los diseños de robótica suave obtuvieron al menos seis puntos en la escala. Una correlación de Spearman fue calculada para determinar la relación entre las puntuaciones de los 10 dispositivos robóticos. Hubo una correlación positiva y alta entre las puntuaciones de ambos evaluadores, la cual fue estadísticamente significativa ($r=0.796$, $p=0.006$).

Tabla 3. Categorización de dispositivos robóticos del estado de arte usando el cuestionario propuesto. Una mayor puntuación indica mayor concordancia con características de robótica suave

Dispositivo/Autor	Evaluador	Pregunta										Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
AMADEO [7]	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
	2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	2
MIT-MANUS [8]	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	1
	2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
ARMEO@Spring [9]	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	1
	2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	2
Bi-Manu-Track [10]	1	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	1
	2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
Órtesis de ReHand-BCI [11]	1	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	7
	2	SI	NO	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	5
MR-Glove [12]	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	10
	2	NO	SI	NO	SI	8						
Biggar <i>et al.</i> [13]	1	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	SI	7
	2	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	6
GraspyGlove [14]	1	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	7
	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	9
Polygerinos <i>et al.</i> [15]	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	8
	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	8
Exo-Glove PM [16]	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	8
	2	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	7

4. Conclusiones

Se identificaron solo dos características de robótica suave que fueron mencionadas por las seis fuentes bibliográficas analizadas, la bioinspiración del diseño y que el movimiento de los actuadores se llevara a cabo por medio de deformaciones de la misma estructura del actuador. Estas dos características se presentan en todos los robots suaves del estado del arte analizados por medio del cuestionario. Por lo que, es posible que sean las características de mayor relevancia para poder identificar diseños de robótica suave para rehabilitación del miembro superior. La necesidad de usar una técnica avanzada de manufactura como la impresión 3D para la construcción de los actuadores, también fue una característica que estuvo presente en la mayor parte de los diseños de robótica suave. Aunque cabe resaltar que para estos diseños, la impresión 3D se utilizó para manufacturar moldes en los cuales se inyectaron polímeros flexibles que formaron la base de los actuadores, o para crear soportes para actuadores neumáticos suaves [16], no para imprimir directamente los actuadores. La órtesis que forma parte del sistema ReHand-BCI, a pesar de contar con una estructura rígida y actuadores formados por un mecanismo de tornillo-tuerca, mostró características de robótica suave, debido a que el funcionamiento del actuador se basa en la deformación de una superficie que provoca la flexión y

extensión de los dedos, con un gran número de grados de libertad [11]. Por lo que este puede ser un ejemplo de un diseño con características híbridas. Otra característica inherente de diseños de robótica suave es la inexactitud del registro de la posición de los dedos, ocasionada por la propia naturaleza de deformación de los actuadores.

La robótica suave puede presentar ventajas sobre los robots rígidos, tales como, un ajuste más ergonómico, la capacidad de que los componentes flexibles presenten una mayor resistencia a rupturas, mayor seguridad para pacientes al no ejercer una resistencia peligrosa, y portabilidad, ya que incluyen todos los componentes del robot en una estructura pequeña y liviana capaz de ajustarse al miembro superior de los pacientes [17]. Por otro lado, la robótica suave también presenta desventajas frente a robots rígidos, por ejemplo, un control más inexacto de la posición de los actuadores debido a la deformación del material flexible, lo que provoca un número cercano al infinito de grados de libertad, y una mayor dificultad de ejercer torques altos, necesarios para mover la extremidad superior paralizada de pacientes con EVC [17]. Estas ventajas de la robótica suave no pueden ser explotadas, ni las desventajas compensadas, a la hora de diseñar robots para neurorehabilitación si no son claramente identificadas en nuevos diseños.

Con la metodología propuesta se puede tener una herramienta para abordar o compensar las desventajas de los diseños de robótica suave. Para ello se podría hacer más eficiente el sistema de actuación suave al incorporar elementos de robótica rígida, como es propuesto en algunos diseños [11], [16], y así compensar la espasticidad de los pacientes. Otro ejemplo es el compensar la dificultad de conocer la posición exacta de los dedos de la mano, al incorporar sensores deformables como parte del diseño.

En este trabajo, la validez de contenido del cuestionario se aseguró con la revisión de la literatura científica para definir las preguntas, como lo sugiere Hernández *et al.* [6]. Además, la confiabilidad inter-evaluador fue evaluada cuantitativamente de forma preliminar. Sin embargo, es necesario realizar estas evaluaciones con un mayor número de experimentadores. Por lo que, como trabajo a futuro, se propone obtener la validez de constructo, la consistencia interna y la confiabilidad inter-evaluador con al menos quince experimentadores [23]. Lo cual permitirá aumentar la probabilidad de que el cuestionario sea utilizado en el área de neurorehabilitación.

El cuestionario presentado es una herramienta tanto para médicos especialistas, terapeutas físicos, e ingenieros biomédicos, que desean desarrollar y validar clínicamente dispositivos robóticos de neurorehabilitación de miembro superior que mejoren la calidad de vida de los pacientes con EVC.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés para este trabajo.

Agradecimientos

Se agradece al alumno Ismael Germán Jerónimo Jiménez, por asistir en la búsqueda bibliográfica. También se agradece al Newton Fund y a la Royal Society del Reino Unido por el financiamiento otorgado en el proyecto NMG\R1\180484.

Referencias

- [1] L. R. Lindsay, D. A. Thompson, and M. W. O'Dell, "Updated Approach to Stroke Rehabilitation," *Med. Clin. North Am.*, vol. 104, no. 2, pp. 199–211, 2020.

- [2] S. C. Ouriques Martins *et al.*, “Priorities to reduce the burden of stroke in Latin American countries,” *Lancet Neurol.*, vol. 18, no. 7, pp. 674–683, 2019.
- [3] P. Langhorne, J. Bernhardt, and G. Kwakkel, “Stroke rehabilitation,” *Lancet*, vol. 377, no. 9778, pp. 1693–1702, 2011.
- [4] C. Y. Chu and R. M. Patterson, “Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: A narrative review,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [5] C. Laschi and M. Cianchetti, “Soft robotics : new perspectives for robot bodyware and control,” vol. 2, no. January, pp. 1–5, 2014.
- [6] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado, and M. del P. Baptista-Lucío, *Metodología de la Investigación*, 6th ed. Ciudad de Mexico: McGraw Hill, 2014.
- [7] I. Aprile *et al.*, “Upper Limb Robotic Rehabilitation After Stroke: A Multicenter, Randomized Clinical Trial,” *J. Neurol. Phys. Ther.*, vol. 44, no. 1, 2020.
- [8] H. I. Krebs, N. Hogan, B. T. Volpe, M. L. Aisen, L. Edelstein, and C. Diels, “Overview of clinical trials with MIT-MANUS: a robot-aided neuro-rehabilitation facility,” *Technol. Heal. Care*, vol. 7, pp. 419–423, 1999.
- [9] C. Colomer *et al.*, “Efficacy of Armeo®Spring during the chronic phase of stroke. Study in mild to moderate cases of hemiparesis,” *Neurol. (English Ed.)*, vol. 28, no. 5, pp. 261–267, 2013.
- [10] S. Hesse, G. Schulte-Tigges, M. Konrad, A. Bardeleben, and C. Werner, “Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 84, no. 6, pp. 915–920, 2003.
- [11] J. Cantillo-Negrete, R. I. Carino-Escobar, P. Carrillo-Mora, D. Elias-Vinas, and J. Gutierrez-Martinez, “Motor Imagery-Based Brain-Computer Interface Coupled to a Robotic Hand Orthosis Aimed for Neurorehabilitation of Stroke Patients,” *J. Healthc. Eng.*, vol. 2018, pp. 1–10, Apr. 2018.
- [12] H. K. Yap, N. Kamaldin, J. H. Lim, F. A. Nasrallah, J. C. H. Goh, and C. Yeow, “A Magnetic Resonance Compatible Soft Wearable Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Brain Imaging,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 782–793, 2017.
- [13] S. Biggar and W. Yao, “Design and Evaluation of a Soft and Wearable Robotic Glove for Hand Rehabilitation,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 24, no. 10, pp. 1071–1080, 2016.
- [14] D. Popov, I. Gaponov, and J. H. Ryu, “Portable exoskeleton glove with soft structure for hand assistance in activities of daily living,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 2, pp. 865–875, 2017.
- [15] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, “Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 73, pp. 135–143, 2015.
- [16] S. Yun, B. B. Kang, and K. Cho, “Exo-Glove PM: An Easily Customizable Modularized Pneumatic Assistive Glove,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 1725–1732, 2017.
- [17] C. Lee *et al.*, “Soft Robot Review,” *Harcourt Brace Coll. Publ.*, vol. 15, no. 1, pp. 3–15, 2017.
- [18] S. Kim, C. Laschi, and B. Trimmer, “Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics,” *Trends Biotechnol.*, vol. 31, no. 5, pp. 287–294, 2013.
- [19] S. Coyle, C. Majidi, P. Leduc, and K. J. Hsia, “Bio-inspired soft robotics : Material selection , actuation , and design,” *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 22, pp. 51–59, 2018.
- [20] M. Cianchetti, C. Laschi, A. Mencias, and P. Dario, “Biomedical applications of soft robotics,” *Nat. Rev. Mater.*, vol. 3, no. 6, pp. 143–153, 2018.
- [21] H. Saigo, M. Naruse, K. Okamura, H. Hori, and I. Ojima, “Analysis of Soft Robotics Based on the Concept of Category of Mobility,” *Complexity*, vol. 2019, p. 1490541, 2019.
- [22] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, “Soft Robotics: Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research,” *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 5, p. 520417, 2008.
- [23] R. Radhakrishna, “Tips for Developing and Testing Questionnaires/Instruments,” *J. Ext.*, vol. 45, no. 1, p. 1, 2007.