Imagen: Rodrigo Osorio Muro

Artículo de investigación interno
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Recibido 06/05/20
Aceptado 07/09/20
Publicado 30/06/21

Diseño de un Sistema Robótico Multipropósito para la terapia de rehabilitación física. Caso de estudio: miembros superiores

Design of a multipurpose Robotic System for the physical rehabilitation therapy. Study case: upper limbs

Piero Paez García* Es Ingeniero Mecánico por el Instituto Politécnico Nacional (IPN); obtuvo su grado de maestría en Tecnología Avanzada con su investigación *Caracterización eléctrica y óptica de celdas solares con polímeros semiconductores*, en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA) del IPN. Laboró en Alcatel-Lucent de Nogales, Sonora, como Ingeniero de Procesos.

Edwing Antonio Almeida Calderón** Es Doctor en Diseño en la línea de Diseño y Desarrollo de Productos; tiene una Maestría en Diseño, Nuevas Tecnologías, Hipermedios, por la Universidad Autónoma Metropolitana; realizó el diplomado en Formación de Facilitadores en Educación para el Diseño, vía internet. Es profesor-investigador titular C de tiempo completo en el área de Diseño Industrial de la UAM, unidad Azcapotzalco. Imparte comúnmente asignaturas como: "Costos", "Diseño para la producción", "Dibujo técnico industrial", "Medios digitales I y II", "Estructuración", "Desarrollo de productos I", "Integral I, II y III". Fue jefe del Área de Investigación de Nuevas Tecnologías y miembro del Comité de Estudios de la Carrera de Diseño Industrial. Fue responsable del colectivo de docencia "Gestión para el Diseño". Fue profesor de asignatura en Universidad del Valle de México, campus Lomas Verdes. Es dueño de Taller-Despacho de Ingeniería y Diseño "Capacitación Integral". Dentro de su cartera de clientes están: Gillete de México, Braun de México y Wilson (J&M Sport). IV Nivel de Inglés en el SELEX de la UAM, TOEFL 533 puntos.

Resumen

El presente documento pretende mostrar la investigación realizada, que servirá como antecedente para el desarrollo de un sistema robótico multipropósito para la terapia en extremidades superiores, mostrando la recopilación de información necesaria respecto de los temas de interés, particularmente: 1) las causas de la discapacidad y las distrofias musculares que requieren terapia de recuperación, 2) las características de los robots existentes, 3) las propuestas para la rehabilitación con robots, y 4) el estado del arte y sus aplicaciones.

Palabras clave: Robots, fisioterapia, rehabilitación, accidente cerebrovascular, distrofias y atrofias musculares, robots para la rehabilitación, discapacidad motora.

Abstract

This document pretend to show the research done that will serve as an antecedent for the development of a multipurpose robotic system for therapy in upper extremities. Performing it the necessary information compilation of the topics of interest, particularly: 1) the causes of the disability and the muscular dystrophies that require recovery therapy, 2) the characteristics of existing robots, 3) the proposals for rehabilitation with robots, and 4) the state of the art and its applications.

Keywords: Robots, physiotherapy, rehabilitation, stroke, muscular dystrophies and atrophies, robots for rehabilitation, motor disability.

Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco,
Av. San Pablo #180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía
Azcapotzalco, C.P. 02200, Ciudad de México, México.
*Piero_91@hotmail.com
**eaac@azc.uam.mx

Introducción

En este artículo se documenta una revisión de la literatura e investigación sobre dispositivos y sistemas robóticos[1] para la rehabilitación de los miembros superiores e inferiores; con el fin de tener un panorama global sobre los diseños y soluciones que facilitan el avance de nuevos dispositivos y de la información relacionada para el desarrollo de un sistema robótico flexible, incluyendo: 1) las discapacidades causadas por distrofias que requieren terapia de rehabilitación, y 2) las características de los robots existentes.

Interés para desarrollar un sistema robótico multipropósito, para la terapia de rehabilitación

De acuerdo con el Consejo Nacional para el Desarrollo y la Inclusión de las Personas con Discapacidad (CONADIS), la población con discapacidad en México es un sector que presenta una situación de salud de gran importancia, lo cual ha derivado en la generación de políticas públicas de salud dirigidas a personas discapacitadas. Según datos del INEGI (2017), de cada 100 personas con discapacidad motora:

- 41.3% sufrieron alguna enfermedad,
- 33.1% están afectados por la edad avanzada,
- 10.7% la adquirieron por herencia, durante el embarazo o al momento de nacer,
- 8.8% quedaron con lesión a consecuencia de algún accidente,
- 5.5% debido a otras causas,
- 0.6% no especificaron el problema.

Uno de los padecimientos más comunes que causan discapacidades motoras es el accidente cerebrovascular, que, por lo regular, ocasiona una parálisis cerebral. La parálisis cerebral es la principal consecuencia de las enfermedades que causan discapacidad motora, la cual constituye una anormalidad de la función de movimientos, debido a un defecto congénito o lesión en el cerebro que altera el funcionamiento normal del sistema nervioso central. Este tipo de trastornos causa: 1) distrofias musculares, y 2) daños en la estructura ósea y en las articulaciones.

Las distrofias musculares conllevan a la degeneración y disminución del tejido muscular, a lo cual se le denomina atrofia muscular, ocasionando una pérdida de fuerza que implica rigidez muscular e inmovilidad. Lo anterior causa un daño al tejido muscular, el cual puede ser permanente (Ball *et al.*, 2019).

No existe una cura para las distrofias musculares, sin embargo, los medicamentos y el tratamiento de rehabilitación pueden ayudar significativamente a controlar los síntomas y a disminuir el avance de la enfermedad.

Las atrofias musculares no necesariamente son causadas por una enfermedad congénita, éstas pueden ocurrir por lesiones sufridas en algún accidente, incluyendo las lesiones deportivas (Lobera, 2010).

Los tratamientos de rehabilitación fundamentados y complementados en dispositivos robóticos mecánicos permiten efectuar mediciones objetivas, útiles y fiables del rendimiento de los pacientes, y generan datos que pueden ser referentes para el personal médico y los fisioterapeutas, esta información podrá ser utilizada como instrumento para hacer más eficientes los tratamientos fisioterapéuticos.

TECNOLOGÍA & DISEÑO
AÑO 10 • NÚM. 15 • ENE. - JUN. 2021
pp 11 - 25

¿En realidad el uso de la robótica en la rehabilitación de personas que sufren discapacidad motora es eficaz para mejorar los tratamientos de fisioterapia?

El caso de estudio trata sobre las dificultades que presentan los pacientes con discapacidad motora en miembros superiores, y cómo los sistemas robóticos pueden ayudar en la rehabilitación de las discapacidades motoras (Cánchica, 2016). Se han recopilado y revisado aproximadamente 53 artículos de diferentes revistas científicas y médicas: *IEEE*, *Elsevier*, *SciELO Médico*, *Medline* y *ResearchGate*, entre otras, relacionados con los conceptos y aspectos más importantes del tema para comenzar a resolver la pregunta inicial.

Esto también incluye la obtención de información de fuentes médicas que describen las funciones fisiológicas e histológicas del sistema nervioso y de los tejidos musculares de las extremidades superiores, además de las características patológicas de las enfermedades que causan discapacidad motora. El proceso de revisión se está llevando a cabo como se muestra en la Figura 1.

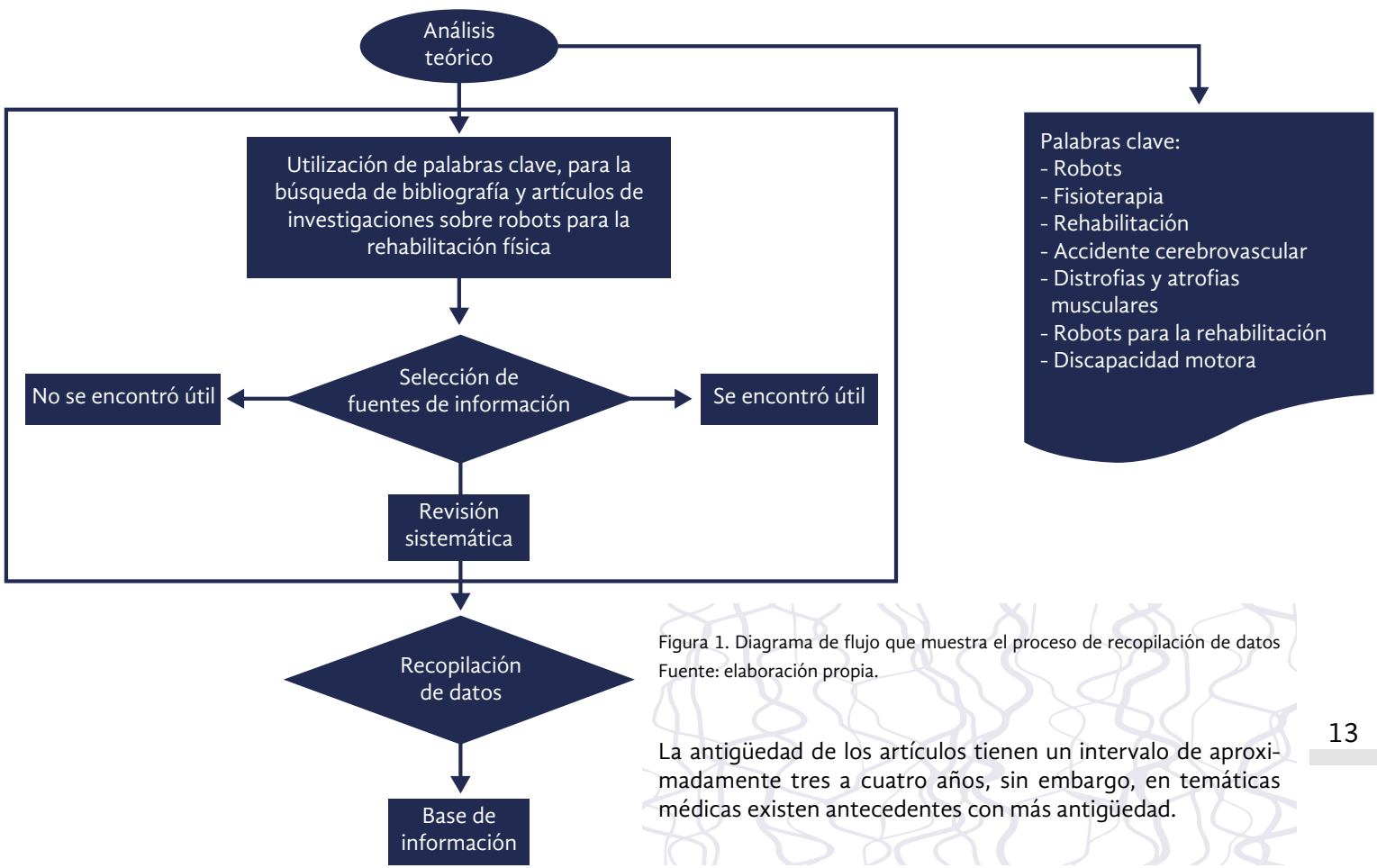


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra el proceso de recopilación de datos
Fuente: elaboración propia.

La antigüedad de los artículos tienen un intervalo de aproximadamente tres a cuatro años, sin embargo, en temáticas médicas existen antecedentes con más antigüedad.

Análisis de la información

Las técnicas tradicionales de fisioterapia implican a menudo la realización de ejercicios manuales intensivos por parte de un fisioterapeuta especialmente preparado, cuyas técnicas están fuertemente enlazadas a su habilidad individual y son muy exigentes en cuanto al tiempo que estos profesionales deben dedicar al aplicarlas. Durante los últimos años se han abierto líneas de investigación respecto a un tipo distinto de rehabilitación fisioterapéutica, se trata de la fisioterapia mediante dispositivos robóticos, fundamentada en la intervención humana (Roger Newport School of Psychology, University of Nottingham, 2017).

El objetivo del análisis de la información es localizar las ventajas y los posibles inconvenientes de los sistemas robóticos para la fisioterapia, y comprarlos con las técnicas de rehabilitación tradicionales. Lo anterior permite desarrollar un estudio de la información que ayuda a visualizar la importancia del argumento del tema y de argumentos relacionados con el concepto de robótica para la rehabilitación. Se han revisado y clasificado en la parte de recopilación de información diferentes artículos con contenido sobre los tópicos, los cuales conducen a un acercamiento del estado del arte de los robots para la rehabilitación.

La información obtenida constituye un referente para el desarrollo y diseño de un prototipo de un sistema robótico multipropósito para la terapia de rehabilitación física (Cánchica, 2016). Este trabajo se está realizando con base en un marco teórico donde se busca identificar y dar respuesta a la interrogante: ¿cómo ayuda la robótica en la rehabilitación de miembros superiores? Se han identificado conceptos relativos e inherentes a la robótica para la rehabilitación y a la rehabilitación física tradicional, tales como: atrofias[2] y distrofias musculares,[3] paresia,[4] hemiplejia,[5] atropometría,[6] ejercicios anaeróbicos,[7] cinemática,[8] cinesiología,[9] tisular,[10] rehabilitación pasiva[11] y rehabilitación activa, entre otros.

TECNOLOGÍA & DISEÑO
AÑO 10 • NÚM. 15 • ENE. - JUN. 2021
pp 11 - 25

De la misma manera, se recabó información médica necesaria para entender las enfermedades y los síntomas que se presentan en la discapacidad motora en los miembros superiores.

A continuación se exponen diferentes definiciones de lo que significa la robótica de rehabilitación:

1. La robótica de rehabilitación es un campo de investigación dedicado a comprender y complementar la rehabilitación mediante la aplicación de movimientos a través de dispositivos mecánicos, incluye el desarrollo de dispositivos cinemáticos automatizados diseñados para ayudar diferentes funciones: sensoriales y motoras (brazos, manos, piernas, tobillos), tomando en consideración dos diferentes aspectos:

1) Asistencia al entrenamiento terapéutico, y
2) Evaluación del rendimiento sensorial y motriz del paciente.

La rehabilitación mediante la robótica generalmente es bien tolerada por los pacientes, y se ha encontrado que es un complemento efectivo de la terapia en personas que sufren de deficiencias motoras, especialmente de algunas enfermedades, como el accidente cerebrovascular (Brewer *et al.*, 2007; Marchal-Crespo & Reinkensmeyer, 2009; Hermano *et al.*, 2004).

2. Los robots para la rehabilitación física son capaces de realizar una terapia de manera efectiva y económica para pacientes con discapacidad motora. Además, éstos pueden monitorear y evaluar el estado de los pacientes con diferentes dispositivos integrados (por ejemplo sensores), los cuales aumentan la precisión de las tareas repetitivas requeridas en el tratamiento fisioterapéutico (Libo *et al.*, 2018).

3. Una revisión sistemática de los tratamientos de fisioterapia ha revelado que la intensidad de las repeticiones de los ejercicios fisioterapéuticos específicos son los principales factores que hacen efectiva la rehabilitación motriz después de un accidente cerebrovascular (funcionan como un entrenamiento deportivo). Se ha demostrado que los robots para la rehabilitación mejoran de una manera sustancial la capacidad motora del paciente, pues pueden efectuar tanto rehabilitación pasiva como rehabilitación activa (Sung *et al.*, 2017).

Antecedentes de la terapia para la rehabilitación con robots

Aunque no hay una fecha definida de los inicios de la rehabilitación asistida con robots, ésta tuvo un auge importante en la década de los años ochenta. En el caso de las extremidades del cuerpo humano, varios autores han propuesto el uso de dispositivos robóticos para la rehabilitación tras un accidente cerebrovascular (ACV) (Volpe *et al.*, 2000). El trabajo pionero de investigadores como Krebs, Volpe y Hogan, del Massachusetts Institute of Technology y del Burke Medical Research Institute demostraron que con el robot MIT-MANUS (Figura 2) se reduce de manera eficaz el tiempo de recuperación motriz del paciente al realizar los ejercicios sistemáticos apropiados. La rehabilitación asistida por robot ofrece ventajas importantes respecto a la fuerza muscular y, en menor grado, una recuperación de la independencia funcional; también se ha demostrado que estos efectos se mantienen durante un periodo relativamente largo. Sin embargo, el efecto terapéutico no es fácilmente transferible a otros miembros o segmentos musculares; debido a que los resultados obtenidos con el robot MIT-MANUS fueron tan prometedores, a partir de esto se empezó a desarrollar toda una gama de robots para la recuperación de la función motora (Krebs *et al.*, 2004).

Figura 2. Robot MIT MANUS (Krebs *et al.*, 2004)

TECNOLOGÍA & DISEÑO
AÑO 10 • NÚM. 15 • ENE. - JUN. 2021
pp 11 - 25

Estadísticas sobre la efectividad de los robots

Gert *et al.* (2007), investigadores de la University Medical Center Utrecht de los Países Bajos realizaron un análisis estadístico que consistió en presentar una revisión sistemática de estudios que mostraran los efectos de la terapia de rehabilitación física asistida por robots, principalmente en la recuperación motora y funcional, para pacientes que sufrieron un accidente cerebrovascular. Los autores incluyeron estudios que satisfacían los siguientes criterios de selección: 1) los pacientes fueron diagnosticados con accidente cerebrovascular (Aisen *et al.*, 1997), 2) investigaron los efectos de la terapia asistida con robots para la extremidad superior (Aisen *et al.*, 1997), 3) el resultado lo midieron en términos de recuperación motora y/o funcional de la extremidad parética superior (Aisen *et al.*, 1997), y 4) el estudio fue un ensayo clínico aleatorio. Para medir los resultados calcularon el tamaño del efecto total (TEF), expresando estas mediciones en unidades de desviación estándar para ambos tipos de recuperación, es decir: la recuperación motora y la recuperación de la capacidad funcional (actividades de la vida diaria (ADL)) (Aisen *et al.*, 1997). En la síntesis de esta investigación se incluyeron diez estudios (Aisen *et al.*, 1997; Burgar *et al.*, 2000; Kahn *et al.*, 2001; Volpe *et al.*, 2000; Lum *et al.*, 2002; Hesse *et al.*, 2005; Daly *et al.*, 2005; Kahn *et al.*, 2006; Lum *et al.*, 2006, y Fasoli *et al.*, 2004) con 218 pacientes.

«...los autores establecieron intervalos de confianza y determinaron el punto medio de éstos...»

Se realizó un metanálisis[12] (Giménez, 2012), el cual es un método de estadística inferencial que resume los resultados. Para realizar el metanálisis y presentar los resultados, los autores establecieron intervalos de confianza y determinaron el punto medio de éstos, el cual representa el tamaño del efecto individual de los datos de cada estudio revisado y el tamaño del efecto total (TEF), posteriormente utilizaron el criterio llamado Clasificación de Cohen (Cohen & Preacher, 2012). Con dicha clasificación establecieron lo siguiente: si el tamaño del efecto (punto medio de los intervalos de confianza y del tamaño del efecto total) es <0.2, el resultado no favorece a la rehabilitación fisioterapéutica con robots, si el TEF se encuentra entre 0.2 y 0.5 el resultado es no significativo y si el TEF es >0.5 favorece a la fisioterapia con robots. En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados del metanálisis; como se puede observar en la tabla 1, el TEF, según el criterio de Cohen, favorece a la recuperación motora, mientras que el TEF de la tabla 2 es menor que lo establecido por Cohen y no favorece a la recuperación funcional.

Tabla 1. Resultados del metanálisis para la recuperación motora

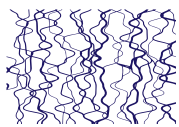
Autor de la investigación	Tamaño de la población (N)	Intervalo de confianza (IC)	Tamaño del efecto (punto medio) (TE)
Aisen *et al.*	20	-0.54 a 1.12	0.24
Burgar *et al.*	20	0.03 a 1.82	0.90
Khan *et al.*	10	-1.88 a 0.71	-0.58
Volpe *et al.*	56	-0.03 a 1.04	0.50
Lum *et al.*	27	-0.66 a 0.85	0.10
Hesse *et al.*	39	2.68 a 4.80	3.74
Daly *et al.*	12	-1.02 a 1.24	0.11
Kahn *et al.*	19	-0.51 a 1.31	0.46
Lum *et al.*	15	-0.57 a 1.53	0.65
Resultados totales (TEF)	218	-0.02 a 1.53	0.65

Fuente: Elaboración propia con base en Gert *et al.* (2007).

Tabla 2. Resultados del metanálisis para la recuperación funcional

Autor de la investigación	Tamaño de la población (N)	Intervalo de confianza (IC)	Tamaño del efecto (punto medio) (TE)
Aisen *et al.*	20	-0.87 a 0.88	0.01
Lum *et al.*	27	-0.73 a 0.78	0.03
Fasoli *et al.*	56	-0.30 a 0.75	-0.23
Lum *et al.*	15	-0.87 a 1.20	0.16
Resultados totales (TEF)	118	-0.23 a 0.50	0.13

Fuente: elaboración propia con base en Gert Kwakkel *et al.* (2007).



En resumen, los datos de las tablas 1 y 2 de este estudio muestran el potencial para dispositivos robóticos que asisten a la fisioterapia.

Los resultados expresados en términos del efecto total estimado, mostrados en unidades de desviación estándar, se calcularon para medir la efectividad de los robots en la recuperación motora y la capacidad funcional (actividades de la vida diaria) utilizando modelos de efectos fijos y aleatorios.

Se confirmó que se pueden obtener mejoras en la función motora de los pacientes, pues el TEF en este metanálisis resultó ser 0.65. Sin embargo, las mejoras en términos de la recuperación funcional no muestran una efectividad a favor de los robots, ya que el TEF fue mucho menor de lo esperado (0.13); según los autores de esta publicación, no se pudieron corroborar con exactitud los datos en la parte funcional, debido a que la información al respecto es variable y poco clara, lo cual puede ser debido a que la recuperación funcional depende de las condiciones del sistema nervioso central, de lo cual es más complicado obtener un seguimiento exacto (Gert *et al.*, 2007).

Estado del arte

El modelo del estado del arte desarrollado se utiliza como una herramienta para el reconocimiento e interpretación de la realidad actual en la que se encuentra la terapia de rehabilitación asistida con robots. Para estar en posibilidad de establecer una propuesta metodológica documental y como base para la toma de decisiones, es importante tomar en cuenta aspectos como el planteamiento del problema de estudio, los límites del mismo y el material documental que se utilizará durante la investigación. Con la finalidad de establecer una contextualización que ayude a comprender las problemáticas que se presenten durante el desarrollo de la investigación, en la Figura 3 se muestra la infografía que describe la lógica del seguimiento del estado del arte para la rehabilitación física asistida con robots.

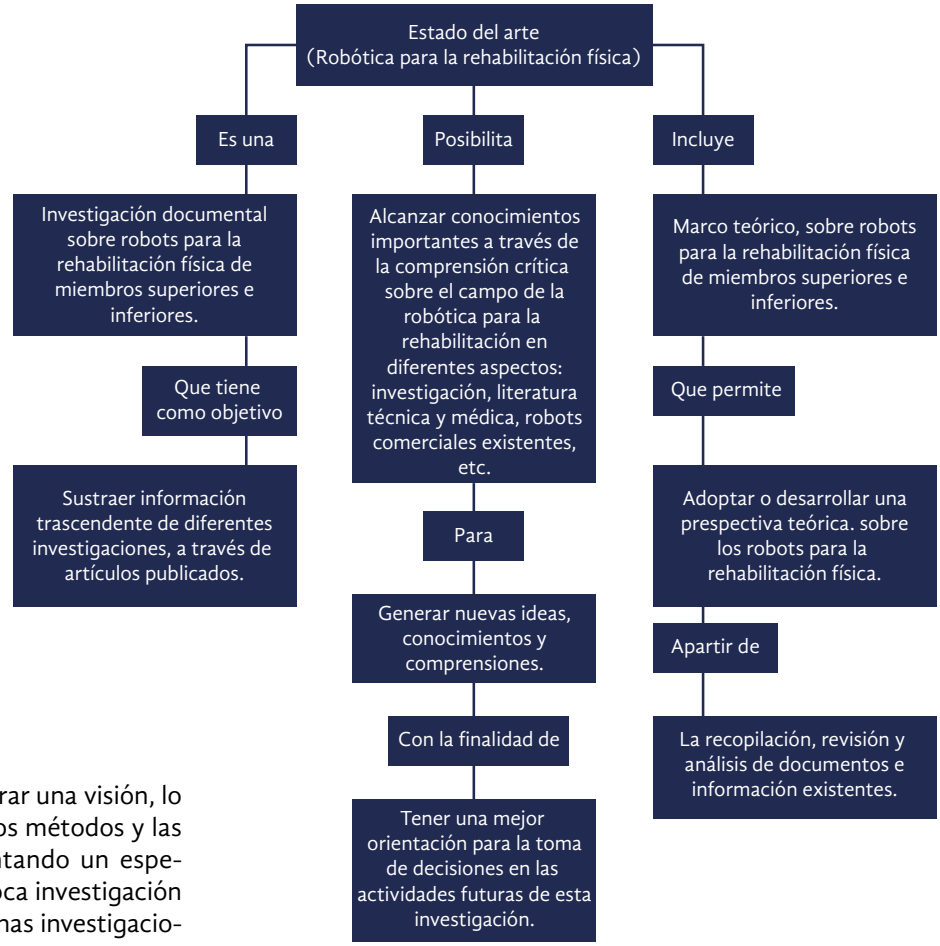


Figura 3. Infografía del estado del arte sobre la rehabilitación física asistida con robots para miembros superiores e inferiores.
Fuente: elaboración propia.

En esta parte del artículo se pretende mostrar una visión, lo más amplia posible, respecto de algunos de los métodos y las técnicas desarrollados más actuales, presentando un especial interés en los tópicos en los cuales hay poca investigación al respecto. A continuación se describen algunas investigaciones relacionadas con el caso de estudio.

Los exoesqueletos robóticos

Los exoesqueletos robóticos se encuentran a la vanguardia de los sistemas automatizados utilizados para la fisioterapia. Abren intervenciones prometedoras durante la rehabilitación, al ayudar a las personas con impedimentos sensoriales y motrices. Este campo de la robótica para la rehabilitación es muy extenso y permite realizar nuevas investigaciones innovadoras, debido a que no existe un modelo cinemático definido. Estos dispositivos tienen la capacidad de proporcionar asistencia variable adaptada a las necesidades específicas de cada individuo, y además pueden medir varios parámetros asociados con la ejecución del movimiento (Allen *et al.*, 2018).

En resumen, en su artículo, Allen *et al.* (2018) describen un método para la evaluación del esfuerzo natural de las partes del cuerpo de un individuo adaptado en un exoesqueleto en su extremidad superior, utilizando un mecanismo exoesquelético llamado *Harmony*, que puede identificar los movimientos activos generados por el usuario. Este método tiene el potencial de servir como una herramienta de evaluación de alta resolución para monitorear el progreso de calidad de movimiento durante todo el tratamiento y evaluar la recuperación motora. Puede detectar las fuerzas neuromusculares involuntarias, que en otros dispositivos son difíciles de percibir (De Oliveira *et al.*, 2019). En general, en su investigación refieren que con los exoesqueletos robóticos se pueden obtener datos cinemáticos de gran utilidad para establecer diseños de robots más precisos para la rehabilitación.

«...este método tiene el potencial de servir como una herramienta de evaluación de alta resolución para monitorear el progreso de calidad de movimiento durante todo el tratamiento y evaluar la recuperación motora...»

TECNOLOGÍA & DISEÑO
AÑO 10 • NÚM. 15 • ENE. - JUN. 2021
pp 11 - 25

Método para hallar la relación que se da entre la aplicación de un robot para la rehabilitación y la respuesta de los movimientos musculares humanos

Se ha realizado un gran esfuerzo en el desarrollo de dispositivos robóticos para apoyar, rehabilitar e interactuar con humanos; a pesar de estos avances, los modelados confiables de los cambios neuromusculares sobre el movimiento humano, como resultado de la aplicación de un dispositivo robótico, siguen siendo complicados. Este artículo trata sobre una investigación que aplica un método para hallar la relación que se da entre la aplicación de un robot para la rehabilitación y la respuesta de los movimientos musculares humanos, utilizando un sensor que permite evaluar la actividad eléctrica muscular (electromiografía de superficie), para observar las señales de un individuo que realiza un movimiento de flexión-extensión del codo, el cual tiene un grado de libertad (DOF). Posteriormente se analizan los resultados preliminares obtenidos, mientras el robot brinda asistencia al sujeto de prueba; durante el análisis de datos se detectaron respuestas inesperadas en el movimiento. El método revela un efecto de neuromuscularidad, es decir, una resistencia involuntaria al movimiento del sujeto con respecto a la aplicación de los movimientos del robot, ya que proporciona una velocidad más lenta que las reacciones del sujeto (Ghonasgi *et al.*, 2019). La caracterización de los resultados mostró diferencias con respecto a lo que se esperaba de la experimentación, por lo tanto, el método descubre aspectos un tanto ambiguos de la interacción robot-humano, creando posibilidades para nuevas modalidades de entrenamiento y aplicaciones ergonómicas en los dispositivos robóticos de rehabilitación física.

Interfaces (sujeciones y acoplamientos) físicas, cómodas y efectivas durante la interacción robot-humano en la rehabilitación física

El diseño de interfaces (sujeciones y acoplamientos) físicas, cómodas y efectivas durante la interacción robot-humano en la rehabilitación física, para atenuar la transferencia de fuerza del robot hacia el usuario, representa un importante desafío para los sistemas humano-robot acoplados al cuerpo humano. Por ejemplo, las fuerzas aplicadas por un robot en los dedos crean reacciones de fuerzas en la superficie dorsal de la mano, que a menudo conducen a concentraciones de presión, las cuales pueden causar dolor e incomodidad. En este artículo presentan la interacción entre la interfaz y la superficie dorsal de la mano y cómo se caracteriza sistemáticamente. Los autores presentan un nuevo método para el diseño de sujeciones cómodas, mostrando, la variación de: 1) la rigidez del dorso de la mano, 2) las características de la superficie de ésta y 3) cómo se cuantifican experimentalmente. Posteriormente, todos estos datos se utilizan para crear diseños que minimicen la presión máxima ejercida sobre el dorso de la mano, variando el perfil de rigidez y flexibilidad de la interfaz, optimizado el diseño para mejorar la distribución de presión del robot que está conectado sobre el dorso de la mano (Rohit *et al.*, 2019). Este enfoque de optimización para diseñar la interfaz se puede aplicar a diferentes miembros, especialmente cuando hay una transferencia de cargas y momentos de flexión mayores a los soportados por el cuerpo humano, siempre y cuando los datos de rigidez apropiados estén disponibles.

Resultados preliminares

1. Se ha encontrado que la terapia asistida con robots presenta una recuperación motora más eficiente con respecto a la terapia convencional; sin embargo, para la recuperación funcional no existe información clara que permita evaluarla.
2. La mayoría de las investigaciones revisadas se enfocan en pacientes que sufren de discapacidad motora, debido a un accidente cerebrovascular.
3. Los pacientes que sufren distrofia y atrofia muscular presentan movimientos involuntarios, que pueden ser perjudiciales al momento de tomar la rehabilitación física con un robot.
4. Los exoesqueletos robóticos están a la vanguardia en la rehabilitación física asistida.
5. Los sistemas humano-robot acoplados presentan un mejor rendimiento en la recuperación que los sistemas que son externos.
6. En la mayoría las investigaciones revisadas no toman en cuenta el movimiento relativo y las fuerzas involuntarias del paciente, lo cual causa incomodidad entre la interfaz de las sujeciones acopladas al paciente y el mecanismo.
7. Con respecto al punto 4, en las investigaciones revisadas dan poca importancia a las cuestiones ergonómicas, es decir, no toman en cuenta las propiedades visco-elásticas de: 1) la piel, 2) el tejido blando subyacente, 3) los coeficientes de fricción entre las sujeciones y la piel y 4) la adaptación de los mecanismos a las características fisiológicas y anatómicas del paciente. En general esto causa incomodidad e inclusive lesiones, además de errores de estimación importantes sobre la recuperación del paciente.
8. Los exoesqueletos pueden funcionar como órtesis, prótesis o un mecanismo de rehabilitación.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación que lleva a cabo Piero Páez García, para obtener el grado de Doctor en Ciencias y Artes para el Diseño en la sección de Diseño y Desarrollo de Productos de la Universidad Autónoma Metropolitana en colaboración con el Dr. Edwing Antonio Almeida Calderón, director de la tesis.

Notas

1 En esta investigación definiremos el término "robot" como un dispositivo mecánico que puede ser automatizado y programado para ejecutar actividades y movimientos de alta velocidad y precisión, las cuales, son complejas para ser realizadas por el ser humano; llamaremos mecanismo a la estructura que conforma al robot. Los criterios para hacer una clasificación sobre los tipos de robots estarán definidos según su estructura mecánica.

2 La atrofia muscular se refiere a la disminución del tamaño del músculo esquelético y, consecuentemente, de la fuerza muscular. La palabra atrofia proviene del griego *àtrophos*, que significa "sin nutrición". Consiste en una disminución importante del tamaño de la célula y del órgano del que forma parte, debido a la pérdida de masa celular. Las células atróficas muestran una disminución de la función, pero no están muertas.

3 La distrofia muscular es un trastorno genético que debilita de forma progresiva los músculos del cuerpo. Está provocada por la presencia de una información genética incorrecta o por la ausencia de la información genética necesaria para producir las proteínas que permiten fabricar y conservar unos músculos sanos.

4 La paresia cerebral se caracteriza por alteraciones del sistema nervioso y muscular en las áreas de tensión muscular (tono), fuerza muscular, coordinación y patrones de movimiento.

5 La hemiplejia es un tipo de parálisis de un lado del cuerpo, causada por una lesión cerebral o de la médula espinal.

6 La antropometría está relacionada con los estudios de la antropología física o biológica, que se ocupa de analizar los aspectos genéticos y biológicos del ser humano, de diferentes grupos y razas para comparar sus características entre sí, es decir, analiza las medidas y proporciones del cuerpo humano.

7 El ejercicio anaeróbico consiste en realizar actividades de alta intensidad de movimientos y fuerza muscular; los músculos entrenados con el ejercicio anaeróbico ofrecen mayor rendimiento al realizar actividades de corta duración y gran intensidad, por lo que este tipo de ejercicio se utiliza para adquirir potencia y masa muscular, y sirve para fortalecer el sistema musculoesquelético.

8 La cinemática es una rama de la física dedicada al estudio del movimiento de los cuerpos en el espacio, sin atender a las causas que lo producen (lo que llamamos fuerzas). Por tanto, la cinemática sólo estudia el movimiento en sí, a diferencia de la dinámica, que estudia las interacciones que lo producen. El análisis vectorial es la herramienta matemática más adecuada para ellos.

9 La cinesiología se basa en el estudio del movimiento muscular de las partes de cuerpo humano.

10 Tisular es un adjetivo que se emplea en el ámbito de la biología para hacer referencia a aquello vinculado a un tejido celular.

11 La rehabilitación pasiva comprende el conjunto de técnicas que se aplican sobre las estructuras afectadas, sin que el paciente realice ningún movimiento voluntario en la zona que hay que tratar.

12 Un metanálisis es un estudio estadístico que hace referencia a los métodos utilizados para comparar y combinar los resultados de diferentes estudios independientes finalizados (notificados o publicados). Su objetivo es identificar patrones, verificar resultados e identificar relaciones relevantes partiendo de múltiples estudios.

Referencias

Aisen, M.L.; Krebs, H.I.; Hogan, N.; McDowel, F., y Volpe, B.T. (1997). *The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke*. Journal Arch Neurol (pp. 443-446), 54, 1997.

Allen, W.; Heinemann; Jayaraman, A. *et al.* (2018). *Experience of Robotic Exoskeleton Use at Four Spinal Cord Injury Model Systems Centers*. Academy of Neurologic Physical Therapy, APTA.

Ball, J.W.; Dains, J.E.; Flynn, J.A.; Solomon, B.S. & Stewart, R.W. (2019). *Musculoskeletal system*. Seidel´s Guide to Physical Examination. (9a. ed.). St Louis, MO: Elsevier.

Brewer, B.R.; McDowell, S.K. & Worthen Chaudhari, L.C. (2007). *Poststroke Upper Extremity Rehabilitation: A Review of Robotic Systems and Clinical Results*. Topics in Stroke Rehabilitation.

Burgar, C.G.; Lum, P.S.; Shor, P.C.; Van der Loos & H.F.M. (2000). *Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/ Stanford experience*. J Rehabil Res Dev.

Cánchica de Medina, M. (2016). *Modelo Gavilán para el desarrollo de competencias en el manejo de información a través de Google drive. Una experiencia Innovadora*. Venezuela: Revista Academia y virtualidad, (9), 2.

Cohen, K.K., & Preacher, K.J. (2012). *On Effect Size*. Psychological Methods (pp. 137-152), 17(2).

Daly, J.J.; Hogan, N.; Perepezko, E.M., *et al.* (2005). *Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke*. Journal Rehabil Res Dev. (pp. 723-736), 42(6).

De Oliveira, A.C.; Warburton, K.; Sulzer, J.S., & Ashish D. (2019) *Effort Estimation in Robot-aided Training with a Neural Network*. Deshpande, Texas University.

Fasoli, S.E.; Krebs, H.I.; Ferraro, M.; Hogan, N., & Volpe, B.T. (2004). *Does shorter rehabilitation limit potential recovery poststroke?"* Neurorehabilitation Neural Repair (pp. 88-94), 18, 2004.

Gert, K.; Boudewijn, J.; Kollen, & Hermano, I. (2007). *Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery after Stroke: A Systematic Review*. Neurorehabil Neural Repair.

Ghonasgi, K.; De Oliveira, A.C.; Shafer, A.; Chad, G.R., & Ashish, D. (2019). *Deshpande Estimating the Effect of Robotic Intervention on Elbow Joint Motion*. Austin: The University of Texas at Austin, Department of Mechanical Engineering.

Giménez, A. (2012). *¿Qué es un meta-análisis? y ¿cómo leerlo?* Revista de Biomedicina (pp. 16-27), 7 (19).

Hermano, K.; Ferraro, M.; Buerger, S.P.; Newbery Miranda, J.; Makiyama, A.; Sandmann, M.; Lynch, D.; Volpe, B.T., & Neville, H. (2004). *Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MIT-Manus*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.

Hesse, S.; Werner, C.; Pohl, M.; Rueckriem S.; Mehrhoz, J., & Lingnau, M.L. (2005). *Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stoke*. Stroke (pp. 1960-1966), 36.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). Banco de indicadores, recuperado de: https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825094409

Kahn, L.E.; Averbuch M.; Rymer, W.Z., & Reinkensmeyer, J. (2001). *Comparison of robot-assisted reaching to free reaching in promoting recovery from chronic stroke*. En Mokhtari, M. (ed). Integration of Assistive Technology in the Information Age. IOS Press (pp. 39-44), 2001. The Netherlands.

Kahn, L.E.; Zygman, M.L.; Rymer, W.Z., & Reinkensmeyer, D. J. (2006). *Robotassisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke a randomized controlled pilot study*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation (pp. -13), 3.

Krebs, H.I.; Ferraro, M.; Buerger, S.P.; Newbery, M.J.; Makiyama, A., & Sandmann, M. (2004). *Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MITManus*. Journal Neuroengineering Rehabil. 2004.

Libo, Z.; Weihai C.; Jianhua, W.; Shaoping, B.; Haoyong, Y., & Yinping, Z. (2018). *A Novel Precision Measuring Parallel Mechanism for the Closed-Loop Control of a Biologically Inspired Lower Limb Exoskeleton*. IEEE/ASME Transcations on Mechatronics, 6 (23).

Lobera Gracida, J., & Mondragón Merino, V. (2010). *Discapacidad motriz. Guía didáctica para la inclusión en educación inicial y básica*. México: Consejo Nacional de Fomento Eeducativo, 12-20.

Lum, P.S.; Burgar, C.G.; Shor, P.C.; Majmundar, M., & Van der Loos, M. (2002). *Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke*. Arch. Phys Med Rehabil (pp. 952-959), 83(7).

Lum, P.S.; Burgar, C.G.; Van der Loos M.; Shor, P.C.; Majmumdar, M., & Yap, R. (2006). *MIME robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: a follow-up study*. Journal Rehabil Res Dev (pp. 631-642), 43, 2006.

Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D.J. (2009). *Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.

Roger Newport School of Psychology (2017). *Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular*. Nottingham, United Kingdom: University Park.

Sung J.B.; Sung, H.J.; Jeong, P.S.; Pyung, H.C., & Yeungnam, U. (2017). *A pilot study on the optimal speeds for passive wrist movements by a rehabilitation robot of stroke patients: A functional NIRS study*. International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Londres: QEII Centre.

Rohit J.V.; Mukherjee, G.; King, R.; Keller, S., & Ashish, D. (2019). *Deshpande, Designing Variable Stiffness Profiles to Optimize the Physical Human Robot Interface of Hand Exoskeletons*. Austin: University of Texas at Austin.

Volpe, B.T.; Krebs, H.I.; Hogan, N.; Edelstein, L.; Diels, C., & Aisen, M.L. (2000). *A novel approach to stroke rehabilitation: robot-aided sensorimotor stimulation*. Neurology (pp. 1938-1944), 54, 2000.