

Avances en rehabilitación robótica para la recuperación de miembros inferiores y asistencia al caminar

Advances in Robotic Rehabilitation for Lower Limb Recovery and Walking Assistance

Sergey González-Mejía¹  José M. Ramírez-Scarpetta¹ 

¹ Grupo de Investigación en Control Industrial (GICI), Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

Introducción: La ingeniería de rehabilitación para la marcha humana es un campo de rápido crecimiento que automatiza las intervenciones terapéuticas, reduciendo el esfuerzo físico requerido de los terapeutas. Esto permite que los terapeutas se concentren en aplicar los protocolos clínicos para el entrenamiento físico y el re-aprendizaje motor. Los sistemas de rehabilitación robótica asistida también permiten la evaluación de la recuperación motora mediante la medición de parámetros clave como los patrones de fuerza, la dinámica de interacción y los movimientos angulares.

Objetivo: El estudio busca ofrecer una revisión descriptiva integral de las plataformas robóticas desarrolladas para la rehabilitación y asistencia de la marcha humana.

Métodos: Dado el rápido avance de la tecnología de exoesqueletos, se hizo un énfasis particular en incorporar los estudios más recientes. Sin embargo, debido a la complejidad del tema, también se consideró un marco temporal de investigación más amplio, abarcando los últimos 14 años. La revisión siguió una estrategia de búsqueda integral en múltiples bases de datos, incluyendo ScienceDirect, Springer Nature, IEEE/ASME, Frontiers, Elsevier, Taylor & Francis, Google Scholar, MDPI, Scopus, ResearchGate, Sage, MDPI y John Wiley & Sons, con el objetivo de identificar todas las tecnologías relevantes relacionadas con los exoesqueletos de miembros inferiores.

Resultados: La robótica de rehabilitación y asistencia es un campo multidisciplinario que abarca áreas como la biomecánica, la interacción humano-máquina, las estrategias de control, el diseño de actuadores y la integración de sensores. Este estudio contribuye con una tabla de clasificación que resume las plataformas robóticas de rehabilitación más representativas, destacando sus características y diferencias mediante variables comparativas.

Conclusión: El análisis descriptivo muestra que los entrenadores de marcha sobre terreno son los sistemas más avanzados y ampliamente utilizados en la robótica de rehabilitación, destacando su efectividad para abordar las complejas necesidades de la rehabilitación de la marcha, lo que los convierte en un foco crítico para la investigación futura.

Palabras clave: Rehabilitación asistida, Sistema de rehabilitación robótica asistida, Exoesqueletos de extremidades inferiores, Exoesqueletos de miembros inferiores, Rehabilitación asistida basada en robots, Sistema de rehabilitación robótica, Asistentes para caminar, Robots usables.

Abstract

Introduction: Rehabilitation engineering for human gait is a rapidly growing field that automates therapeutic interventions, reducing the physical effort required from therapists. This enables therapists to concentrate on implementing clinical protocols for physical rehabilitation and motor re-learning. The assisted robotic rehabilitation systems also enable the assessment of motor recovery by measuring key parameters such as force patterns, interaction dynamics, and angular movements.

Objective: The study seeks to provide a comprehensive descriptive review of robotic platforms developed for the rehabilitation and assistance of human gait.

Methods: Given the rapid advancements in exoskeleton technology, particular emphasis was placed on incorporating the most recent studies. However, due to the topic's complexity, a broader research timeframe, spanning the last 14 years, was also considered. The review followed a comprehensive search strategy across multiple databases, including ScienceDirect, Springer Nature, IEEE/ASME, Frontiers, Elsevier, Taylor & Francis, Google Scholar, MDPI, Scopus, ResearchGate, Sage, MDPI y John Wiley & Sons, aiming to identify all relevant technologies related to lower limb exoskeletons.

Results: Rehabilitation and assistance robotics is a multidisciplinary field, covering areas such as biomechanics, human-machine interaction, control strategies, actuator design, and sensor integration. This study contributes a classification table that summarizes the most representative rehabilitation robotic platforms, highlighting their features and differences using comparative variables.

Conclusion: The descriptive analysis shows that overground gait trainers are the most advanced and widely used systems in rehabilitation robotics, emphasizing their effectiveness in meeting the complex needs of gait rehabilitation, making them a critical focus for future research.

Keywords: Assisted rehabilitation, Assisted robotic rehabilitation system, Extremity lower exoskeletons, Lower limb exoskeletons, Robot-based assisted rehabilitation, Robotic rehabilitation system, Walking assistants, Wearable robots.

¿Cómo citar?

González-Mejía S, Ramírez-Scarpetta JM. Avances en rehabilitación robótica para la recuperación de miembros inferiores y asistencia al caminar. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(1) e-30314594

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.14594>

Recibido: 21-11-24

Evaluado: 20-12-24

Aceptado: 14-02-25

Online: 25-02-25

Correspondence 

sergey.gonzalez@correo.univalle.edu.co



Contribución a la literatura

¿Por qué se realizó?

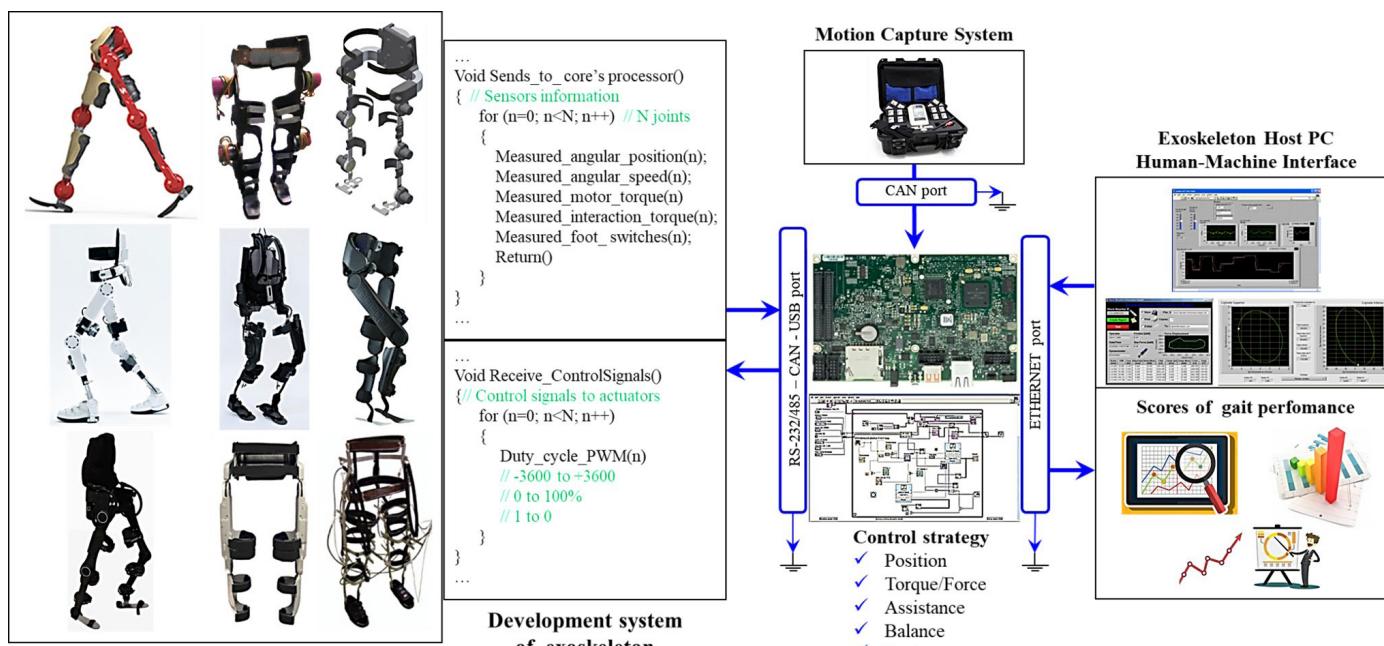
Este estudio se realizó para proporcionar una revisión estructurada y completa de las plataformas robóticas diseñadas para la rehabilitación de miembros inferiores y la asistencia a la marcha. Dada la naturaleza multidisciplinaria de la robótica de rehabilitación, la investigación tuvo como objetivo clasificar y analizar los sistemas existentes según sus principios de rehabilitación, destacando sus características clave, avances tecnológicos y desafíos en la aplicación clínica.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El estudio identificó a los entrenadores de marcha de superficie como los sistemas robóticos de rehabilitación más avanzados y ampliamente utilizados, destacando su capacidad para replicar patrones naturales de movimiento y mejorar los resultados de los pacientes. Además, la clasificación de las plataformas robóticas proporcionó un análisis comparativo de las características clave de diseño y control, demostrando la interacción entre la biomecánica, la interacción hombre-máquina y las estrategias de control en la eficacia de la rehabilitación.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos hallazgos ofrecen información valiosa sobre el estado actual y la dirección futura de los sistemas robóticos de rehabilitación. Al identificar tendencias y desafíos tecnológicos clave, como la necesidad de estrategias de control adaptativo y rehabilitación personalizada, este estudio contribuye a la optimización de la terapia asistida por robot. Los resultados sirven de referencia para investigadores y desarrolladores, impulsando el desarrollo de tecnologías de rehabilitación más efectivas y centradas en el usuario.



Introducción

La ingeniería de rehabilitación en el contexto de la marcha humana es un campo emergente y de rápido crecimiento que ofrece soluciones innovadoras para automatizar las intervenciones terapéuticas. La rehabilitación robótica reduce el esfuerzo físico requerido por parte de los terapeutas sin reemplazar su participación directa. Esto les permite centrarse en la implementación de protocolos clínicos para el entrenamiento físico o el reaprendizaje motor con movimientos repetitivos más intensos y coordinados. Estos sistemas pueden aliviar la presión articular a través de mecanismos de Soporte de Peso Corporal (BWS) generando patrones de marcha fisiológicos adecuados adaptados a la antropometría del paciente, y facilitando la participación pasiva/activa del paciente a través de la interacción humano-robot. Además, estos sistemas permiten la evaluación cuantitativa de la restauración funcional del motor a través del análisis de patrones de fuerza, dinámica de interacción, movimientos angulares y otros parámetros relevantes. A mediano plazo, la integración de esta tecnología por parte de los centros de rehabilitación podría reducir significativamente el costo económico de las terapias, haciéndolas más accesibles a las poblaciones vulnerables con discapacidad y mejorando así su calidad de vida.

Este artículo presenta una revisión exhaustiva de los avances de última generación en sistemas de rehabilitación asistida por robot, con énfasis en la recuperación de las extremidades inferiores y el apoyo para caminar. La segunda sección describe la metodología utilizada para clasificar las plataformas robóticas para la rehabilitación y asistencia de personas con discapacidades motoras, incluidos los asistentes para caminar en cinta rodante, los asistentes para caminar basados en placas para los pies, los asistentes para caminar móviles y los asistentes para caminar estacionarios. En la tercera sección se ofrece un análisis detallado de los resultados. En la cuarta sección se discuten los resultados, mientras que en la quinta sección se resumen las principales conclusiones.

Materiales y métodos

Los autores de este estudio llevaron a cabo una extensa revisión exploratoria de la literatura existente para identificar áreas de interés y refinar los objetivos y el alcance de su análisis. Esta exploración inicial proporcionó una base para definir el objetivo de la revisión y garantizar un enfoque centrado.

Teniendo en cuenta los rápidos avances en la tecnología de exoesqueletos en los últimos años, se ha hecho especial hincapié en la incorporación de los estudios más recientes. Sin embargo, reconociendo la importancia y complejidad del tema, se consideró necesario un marco temporal de investigación más amplio, que abarcara los artículos publicados en los últimos 14 años.

El marco metodológico para esta revisión implicó una búsqueda exhaustiva en múltiples bases de datos y fuentes, incluyendo ScienceDirect, Springer Nature, IEEE/ASME, Frontiers, Elsevier, Taylor & Francis, Google Scholar, MDPI, Scopus, ResearchGate, Sage, MDPI y John Wiley & Sons. Este proceso tuvo como objetivo identificar todas las tecnologías relevantes relacionadas con los exoesqueletos de las extremidades inferiores.

Las palabras clave principales utilizadas durante la búsqueda inicial fueron "Exoesqueletos de extremidades inferiores", "Exoesqueletos de extremidades inferiores" y "Exoesqueletos robóticos de

extremidades inferiores". Para refinar la búsqueda y manejar el volumen sustancial de información disponible, se aplicaron palabras clave de filtrado adicionales, incluidos términos como "Robots portátiles", "Asistencia", "Rehabilitación", "Asistencia", "Dispositivo robótico de asistencia", "Sistema robótico de asistencia", "Sistema de rehabilitación robótica", "Sistema de rehabilitación robótica asistida", "Rehabilitación robótica", "Rehabilitación asistida", "Rehabilitación asistida basada en robots", "Rehabilitación de extremidades inferiores asistida por robots", "Asistentes para caminar", "Marcha asistida" y "Rehabilitación de la marcha asistida".

Este enfoque dio lugar a la identificación de numerosos documentos candidatos para su posterior análisis. Cada artículo se analizó meticulosamente para extraer información sobre las tecnologías aplicadas a los exoesqueletos de las extremidades inferiores, que abarcan diversos campos como la ingeniería de rehabilitación, la robótica, los sistemas de control, la automatización, la biomecánica, los sistemas hombre-máquina, los dispositivos médicos, la ingeniería mecatrónica, la ingeniería mecánica y la medicina industrial.

La selección de los artículos para esta revisión del estado del arte se guió por criterios de inclusión bien definidos para garantizar un análisis exhaustivo y de alta calidad de la literatura seleccionada. En primer lugar, se priorizó la pertinencia temática, asegurando que todos los estudios seleccionados abordaran directamente el tema de investigación y sus subtemas clave. En segundo lugar, se hizo hincapié en el rigor y la calidad científica, incluyendo artículos publicados en revistas indexadas, sometidos a revisión por pares y empleando metodologías robustas. En tercer lugar, se consideró la actualidad de las publicaciones, favoreciendo los estudios recientes para reflejar los últimos avances, al tiempo que se incorporaron trabajos seminales fundamentales para comprender el desarrollo histórico del campo. En cuarto lugar, la originalidad y la contribución fueron esenciales, centrándose en investigaciones que proporcionaron hallazgos significativos, perspectivas novedosas o metodologías emergentes. En quinto lugar, se alentó la diversidad geográfica y cultural para lograr una perspectiva mundial, prestando atención a los estudios de regiones específicas cuando fuera pertinente. En sexto lugar, se consideraron las fuentes confiables y el impacto de las citas, seleccionando artículos de revistas de renombre y con mayor influencia académica. Por último, la inclusión abarcó varios tipos de publicaciones, como artículos originales de investigación, revisiones sistemáticas, encuestas, capítulos de libros, patentes, actas de congresos, metaanálisis e informes técnicos, dependiendo de su relevancia y contribución al tema. Estos criterios garantizan colectivamente una síntesis completa, equilibrada y crítica de la literatura.

El presente examen exhaustivo de los avances más avanzados no pretende ser principalmente innovador en sí mismo; sin embargo, se destaca por ofrecer una perspectiva original que permite una categorización e interpretación sistemática y completa de los avances existentes en el campo. Además, identifica las tendencias emergentes que ponen de relieve áreas potencialmente poco exploradas o no reconocidas, que son cruciales para guiar la investigación futura. En este sentido, el trabajo presentado hace una contribución significativa al desarrollo del campo al proporcionar una revisión exhaustiva basada en los principales estudios, tendencias, tecnologías y teorías relevantes, cuidadosamente compilados a partir de fuentes confiables, y al mejorar la comprensión global del tema en consideración.

Sistemas robóticos para la rehabilitación de la marcha

El desarrollo de asistentes robóticos a través de diferentes disciplinas e investigación biomédica está permitiendo el acoplamiento y sincronización humano-robot en un sistema factible, donde el robot puede apoyar al humano en una tarea específica. El sistema acoplado se basa en la contribución de la inteligencia humana y luego se beneficia del rendimiento, la potencia y la precisión del sistema robótico; que genera un robot orientado al usuario. En (1) Se discuten los avances de los mecanismos y controladores para la rehabilitación asistida por robots. Además, el estudio (2) presenta una clasificación de los exoesqueletos de extremidades inferiores (LEE) en tres categorías distintas en función de sus aplicaciones y usuarios previstos: rehabilitación de la marcha, asistencia con la locomoción humana y aumento de la fuerza humana.

Los sistemas robóticos diseñados para ayudar en la rehabilitación de la marcha humana a menudo se denominan plataformas o asistentes robóticos y se clasifican en función de sus principios de rehabilitación subyacentes. Figura 1: Asistentes de cinta de correr, asistentes basados en reposapiés, asistentes móviles y asistentes estacionarios.

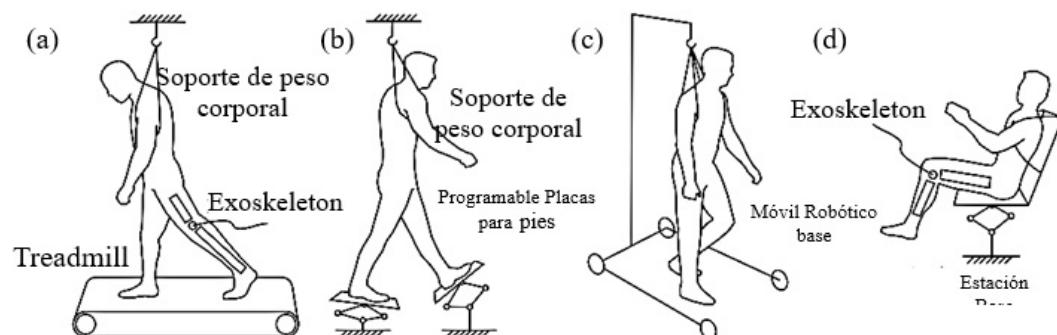


Figura 1. Asistentes robóticos para la rehabilitación asistida de la marcha. (a) Exoesqueleto con cinta de correr, (b) Placas para los pies, (c) Exoesqueleto autónomo y (d) Estacionario. (3)

Caminantes con cinta de correr

Las terapias de rehabilitación tradicionales se basan en un protocolo clínico que incluye el uso de una cinta de correr combinada con un sistema de soporte parcial del peso corporal (BWS) como parte del proceso para abordar la movilidad funcional. Por ejemplo, las extremidades y caderas del paciente son asistidas por tres terapeutas para facilitar la marcha en la cinta de correr, mientras que un arnés ayuda a soportar el peso corporal. El objetivo principal de los sistemas robóticos es automatizar y refinar este enfoque convencional, reduciendo así el esfuerzo físico requerido por parte de los terapeutas (4). Estos sistemas logran esto mediante el empleo de articulaciones motorizadas para ayudar a las extremidades inferiores del paciente, ajustando la distribución del peso e incorporando biorretroalimentación para promover la participación activa del paciente.

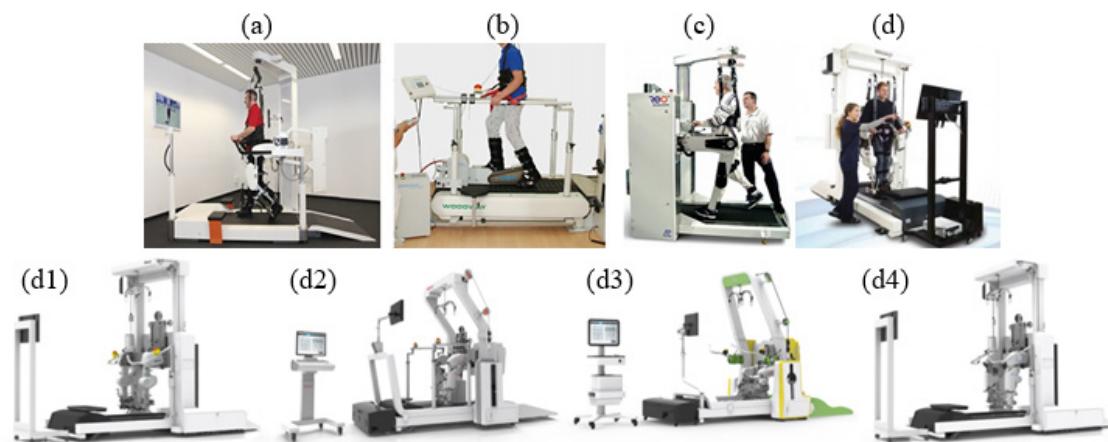


Figura 2. Asistentes para caminar con cinta de correr. a) Lokomat (5), (b) LokoHelp o Pedago (6), c) ReoAmbulador (7), d) Walkbot (8). Serie de walkbots: (d1) Global (Walkbot_G), (d2) Superior (Walkbot_S), (d3) KID (Walkbot_K) y (d4) Premium (Walkbot_P).

Por lo general, estos sistemas contienen un exoesqueleto y una cinta de correr, Figura 1(a). En el mercado están el Lokomat, el LokoHelp, el ReoAmbulator y el Walkbot. El Lokomat, desarrollado por Hocoma AG, está compuesto por una ótesis robótica de marcha con BWS y cinta de correr (5,9,10); Dispone de servomotores para las articulaciones de la cadera y la rodilla, Figura 2(a); La velocidad de la cinta de correr está sincronizada con la velocidad de marcha de la ótesis. El LokoHelp, diseñado por el Grupo LokoHelp, es un dispositivo electromecánico creado para mejorar la recuperación de la marcha después de una lesión cerebral (11); Se coloca en la cinta de correr y se asegura con una pinza, también incorpora un sistema para soportar el peso corporal del paciente, Figura 2(b). El ReoAmbulator, desarrollado por Motorika Ltd. y distribuido en los Estados Unidos bajo el nombre de AutoAmbulator, representa un sistema robótico adicional que incorpora BWS y una cinta de correr (7,12); Los brazos robóticos están unidos a las piernas del paciente, específicamente en el muslo y el tobillo, se mueven en un patrón paso a paso, Figura 2(c). El Walkbot propiedad de P&S Mechanics Figura 2 (d), es un sistema de rehabilitación de entrenamiento de la marcha asistido por robot que proporciona un patrón de marcha natural y preciso para el paciente, y utiliza un motor de accionamiento de la articulación de la cadera/rodilla/tobillo en el plano sagital combinado con un sistema BWS y una cinta de correr motorizada (8,13); la serie Walkbot tiene cuatro modelos: el Walkbot_G que es compatible para adultos y pacientes pediátricos con discapacidades neurológicas o musculoesqueléticas, Figura 2 (D1); el Walkbot_S, que ofrece un modo de entrenamiento interactivo inteligente y utiliza la biorretroalimentación en tiempo real para mantener a los pacientes motivados, Figura 2 (D2); el Walkbot_K, que está dedicado a pacientes pediátricos, Figura 2 (D3); y el Walk_P que es un dispositivo médico de rehabilitación para adultos con discapacidades neurológicas o musculoesqueléticas que desean perfeccionar su caminar, Figura 2 (D4).



Figura 3. Plataforma de rehabilitación asistida de la marcha humana, RUVEM (14)

Del mismo modo, existen plataformas de investigación centradas en la rehabilitación asistida de la marcha, como la plataforma RUVEM, Figura 3, que es un dispositivo de laboratorio utilizado para desarrollar trabajos de investigación dentro del grupo GICI de la Universidad del Valle (15) y se dedica a apoyar la rehabilitación de personas con discapacidades neuromotoras; consta de un exoesqueleto de extremidad inferior, una cinta de correr instrumentada y un sistema BWS (14,16–19); el exoesqueleto puede reproducir un patrón fisiológico de marcha y lograr un gran equilibrio de desviación; La cinta de correr es un sistema comercial modificado para la rehabilitación de la marcha a una velocidad máxima de 0.8, puede proporcionar una velocidad constante durante la terapia y fue modificada para ayudar a caminar con seguridad a través de rieles laterales a lo largo de la cinta y tiene un control de posicionamiento que ajusta automáticamente la velocidad de la banda en función de la velocidad del individuo; el sistema BWS compensa un porcentaje de peso soportado por las extremidades inferiores de los pacientes con movilidad reducida; RUVEM está en desarrollo, y el propósito es el seguimiento activo del movimiento vertical del tronco del sujeto garantizando una marcha natural en la cinta de correr. El Laboratorio de Biomecatrónica de la Universidad de California ha diseñado y desarrollado múltiples dispositivos robóticos destinados al entrenamiento de la marcha en personas que se recuperan de lesiones de la médula espinal; entre ellas se encuentra la Herramienta Robótica de Asistencia a la Deambulación para la Rehabilitación Humana (ARTHuR) m/s (20), que está diseñado para medir y ajustar los pasos en una cinta de correr; la órtesis de marcha operada neumáticamente (POGO), una versión mejorada del Leg-Robot; y el Manipulador de Asistencia Pélvica (PAM) (21), lo que facilita el control natural del movimiento pélvico.

Otros asistentes robóticos como el Exoesqueleto Activo de Pierna (ALEX) con actuadores lineales en las articulaciones de la cadera y la rodilla; tiene un controlador de fuerza para ayudar al paciente a través del enfoque de asistencia según sea necesario (AAN) (22). El LOwer-extremity Powered ExoSkeleton (LOPES) es un robot para la rehabilitación asistida por la marcha; Facilita el movimiento de las piernas de una persona durante la marcha en cinta y se conecta de forma flexible a nivel de la pelvis. (23). La ótesis robótica accionada que se utiliza para el entrenamiento automatizado de la locomoción llamada ALTRACO, es un robot de rehabilitación de pasos equipado con un actuador neumático ligero (24); La ótesis robótica está compuesta por un

exoesqueleto unilateral y un brazo de soporte para estabilizarse a través del equilibrio gravitatorio. El sistema de Rehabilitación Robótica de la Marcha (RGR) se centra en las desviaciones secundarias de la marcha de los pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular; mientras el paciente se somete a un entrenamiento en cinta rodante, se aplican fuerzas verticales a la pelvis, ejerciendo fuerzas para contrarrestar las desviaciones del movimiento pélvico típico (25); el dispositivo se conecta al paciente mediante un sistema de soporte ortopédico. El asistente String-Man, creado por Fraunhofer IPK en Berlín, es una plataforma robótica destinada a facilitar la rehabilitación de la marcha y promover la recuperación de las funciones motoras; Su diseño incluye una estructura cinemática compuesta por siete cables conectados al torso del paciente (26).

Asistentes para caminar basados en placas para los pies

Ciertos sistemas para la rehabilitación asistida de la marcha utilizan placas de pie programables como componente fundamental, Figura 1(b); En estos sistemas, los pies del paciente descansan sobre placas separadas y el mecanismo robótico controla sus movimientos para simular los patrones de marcha y las fuerzas de reacción del suelo. El sujeto está de pie y está sostenido por barras paralelas y un arnés; el movimiento se transmite desde las plantas de los pies hasta las articulaciones; Sin embargo, estos sistemas son pesados.

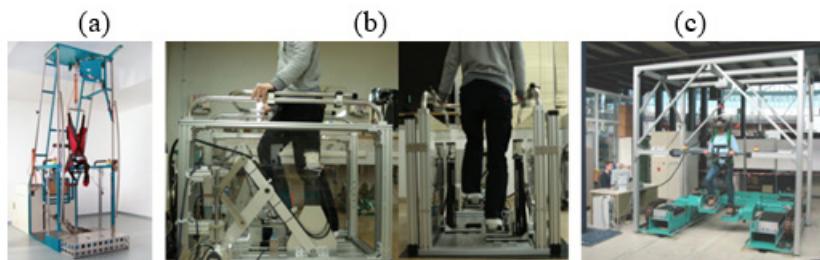


Figura 4. Ayudantes de marcha basados en placas para los pies. a) Entrenador de pandillas GT I (27),
(b) Maestro de la marcha5 (28) y (c) HapticWalker (29).

Los siguientes asistentes se basan en placas de pie: The Gangtrainer (GT I), Figura 4(a), comercializado por Reha-Stim, ayuda en el restablecimiento de la movilidad de las extremidades inferiores al restar el peso del paciente y adaptar la velocidad de la marcha en función de la capacidad individual del paciente (27); el paciente se coloca sobre dos placas y se asegura con un arnés, y los movimientos generados por el sistema pueden simular la fase de apoyo y balanceo; el asistente está equipado con cables conectados al paciente, que controlan los ajustes verticales y laterales del centro de masa. El sistema de rehabilitación de la marcha conocido como GaitMaster5 (GM5), desarrollado en la Universidad de Tsukuba, consiste en asegurar los pies del paciente a plataformas equipadas con sensores (28), como se muestra en Figura 4(b); estas bases mueven los pies del usuario hacia adelante, replicando los movimientos de caminar o simulando actividades como subir escaleras. El HapticWalker es una interfaz de locomoción háptica capaz de simular trayectorias lentas y suaves, como caminar sobre terreno plano o subir/bajar escaleras, además, simula movimientos como caminar sobre terrenos irregulares, incluso tropezar o resbalar, lo que requiere un sistema con dinámicas de orden superior (30); se trata de un rediseño del sistema GT I basado en reposapiés con trayectorias totalmente programables, Figura 4(c).

Otras plataformas basadas en reposapiés, como el Robot de Rehabilitación de Extremidades Inferiores (LLRR), ayudan a los pacientes a replicar los movimientos naturales de la marcha y a ejercitarse los músculos de las piernas (31); consiste en un sistema de control de la postura de los escalones y reducción de peso. En la Universidad Nacional de Gyeongsang se desarrolló un robot con seis grados de libertad diseñado para la rehabilitación de la marcha (32); este sistema cuenta con conexiones a las extremidades superiores e inferiores, lo que permite ajustes a la velocidad de la marcha en diferentes terrenos; consta de un dispositivo de extremidad superior, un mecanismo de deslizamiento, dos bases plantares y un sistema BWS.

Asistentes móviles para caminar

Estos sistemas robóticos generan marcha a ras de suelo, permitiendo a los pacientes trasladarse y moverse de forma autónoma, en lugar de depender de patrones de movimiento predefinidos, Figura 1(c). Este tipo de asistente se conoce como exoesqueleto autónomo y tiene el propósito de ayudar a la marcha autónoma; el exoesqueleto es liviano y su fuente de energía es una batería.

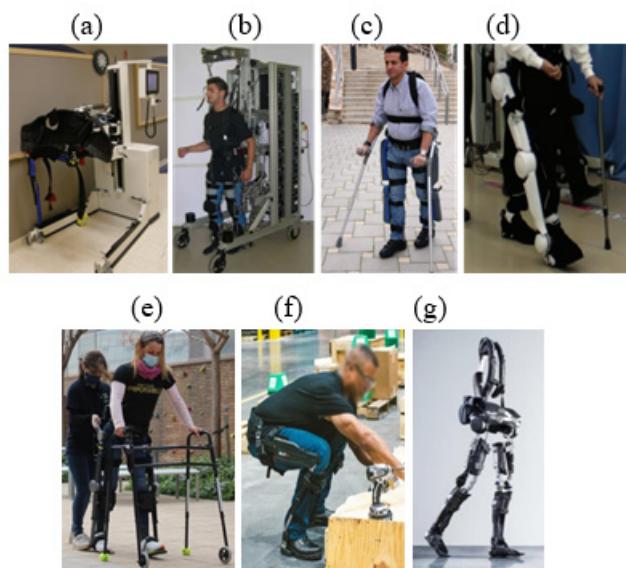


Figura 5. Asistentes móviles para caminar. (a) KineAssist (33), (b) WalkTrainer (34), (c) ReWalk (35), (d). HAL de una sola pata (36), e) Capaz (37), (f) IefX (38) y (g) PhoeniX (39).

Entre estos tipos de asistentes se encuentran los siguientes: el KineAssist desarrollado por Kinea Design, LLC, es un sistema robótico diseñado para la rehabilitación de la marcha y el equilibrio (33); está equipado con un arnés de torso y pélvica unido a una plataforma robótica móvil, como se muestra en Figura 5(a); el robot responde en función de las fuerzas ejercidas por el paciente que se miden mediante células de carga integradas en el arnés pélvico. El andador robótico de rehabilitación conocido como WalkTrainer de Swortec SA, consta de una órtesis pélvica, BWS, una órtesis bilateral y un electroestimulador operado en tiempo real (34,40); es un andador para la reeducación de la marcha, Figura 5(b). El ReWalk de Argo Medical Technologies Ltd., es un traje

motorizado, quasi-robótico y ponible, Figura 5c), que puedan utilizarse en actividades terapéuticas (35); este traje está equipado con motores de corriente continua en las articulaciones, baterías, sensores y un sistema de control desplegado en una computadora; los movimientos de la parte superior del cuerpo se detectan y se utilizan para iniciar y mantener el proceso de marcha. El robot portátil llamado Hybrid Assistive Limb (HAL) está diseñado para diversos propósitos, como la rehabilitación y el apoyo de trabajo pesado; se ofrece en varias configuraciones, incluidas las versiones de cuerpo completo y dos patas (41); además, se ha creado una versión de una sola pata del HAL para ayudar a la marcha de las personas con hemiplejia, como se ilustra en Figura 5(d). El exoesqueleto ABLE es un dispositivo para ayudar a sujetos con limitaciones de movilidad que afectan la capacidad de pararse, caminar y sentarse. Figura 5e), Los médicos pueden modificar el nivel de apoyo ofrecido en cada articulación (37). El legX es un exoesqueleto diseñado para apoyar las rodillas del usuario, lo que le permite realizar sentadillas repetidamente o sostenerlas durante períodos prolongados con el mínimo esfuerzo (38); Además, el exoesqueleto funciona como una silla ajustable, capaz de ajustarse a varias alturas. Figura 5(f). El exoesqueleto PhoeniX es una órtesis de cadera impulsada por la parte inferior del cuerpo diseñada para ayudar a las personas con problemas de movilidad. Figura 5g); está siendo desarrollado por SuitX, anteriormente US Bionics; tiene dos actuadores en las caderas, para la fase de balanceo, las articulaciones de la rodilla permiten el apoyo durante la postura y la distancia al suelo, (39). Otros asistentes como WHERE I y II también son sistemas móviles para la rehabilitación de la marcha que permiten el entrenamiento en el suelo (42).

Un sistema comercial de rehabilitación sobre el suelo diseñado para la investigación es el exoesqueleto robótico de extremidades inferiores Exo-H3 propiedad de Technaid S.L. (43), que puede ayudar a las personas con pérdida parcial de la capacidad de caminar después de un accidente cerebrovascular. Es un exoesqueleto motorizado de cadera-rodilla-tobillo con seis articulaciones accionadas en el plano sagital, el sistema mecánico comprende servomotores, engranajes, barras de extensión, plantillas, fijación de caderas y correas, Figura 6. El bastidor principal está compuesto de acero inoxidable y aluminio de alta resistencia. El exoesqueleto se adapta a diferentes tamaños.

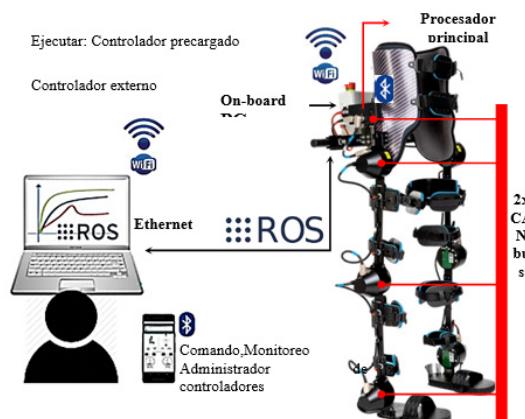


Figura 6. Exoesqueleto de extremidades inferiores Exo-H3 (43).

En la referencia (44), se presenta un catálogo que clasifica los exoesqueletos por categoría (comercial, industrial, médica y militar) y por aplicación (asistencial, aumento, pediatría, rehabilitación, investigación, etc.). Este informe sobre exoesqueletos hace hincapié en proporcionar actualizaciones y recursos relacionados con el campo emergente de los exoesqueletos, los exotrajes y la tecnología robótica portátil. Asimismo, la revisión sistemática (45) proporciona una descripción general de las características técnicas clave de 25 exoesqueletos portátiles de extremidades inferiores, incluidos factores como la disponibilidad comercial, las articulaciones compatibles, la población objetivo, los métodos de control, el almacenamiento de energía, la detección de la fase de la marcha, el inicio de la marcha, el uso previsto (rehabilitación/aumento), la certificación (marcado CE/aprobación de la FDA) y el grupo de usuarios previsto, entre otros. Del mismo modo, el documento (46) explora la historia de los exoesqueletos robóticos diseñados para caminar bípedo, discutiendo los desafíos presentes en los diseños actuales de exoesqueletos bípedos. Además, categoriza estos exoesqueletos en tres enfoques principales: médico, industrial y militar, al tiempo que enfatiza las diferencias en la prominencia de su ámbito de uso dentro de los diseños existentes.

Asistentes fijos para caminar

El objetivo de estos asistentes es promover el fortalecimiento muscular, desarrollar resistencia a la fatiga y apoyar el rango de movimiento y el patrón fisiológico de la marcha, Figura 1d). Además, el sistema robótico está dirigido a pacientes sin capacidad de estar de pie y que necesitan hacer ejercicio y activar el sistema circulatorio, renal y locomotor.

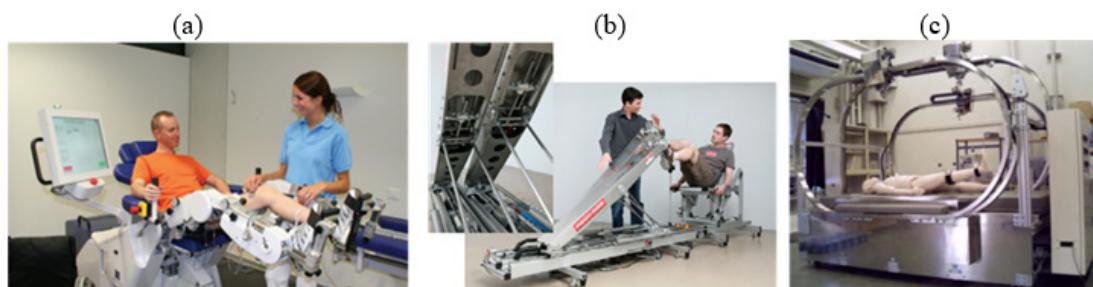


Figura 7. Asistentes estacionarios para caminar. (a) Creador de movimiento (47), b) Lambda (48) y c) Mecanismo accionado por cable (49).

Entre los sistemas robóticos desarrollados sobre la base de este principio se encuentra el MotionMaker, creado por la empresa Swortec SA (47). Este sistema está diseñado para el entrenamiento estático, como se ilustra en Figura 7(a), permitir el acondicionamiento físico con la participación activa de las extremidades no funcionales, que están aseguradas a la ótesis a nivel del pie para replicar naturalmente las fuerzas de reacción del suelo. Además, incorpora estimulación eléctrica controlada y ajustada a los niveles de esfuerzo del paciente. El robot de rehabilitación conocido como Lambda, es un dispositivo para la rehabilitación y el acondicionamiento físico en la rotación del tobillo y el movimiento de las extremidades inferiores en el plano sagital (48), Figura 7b). Un sistema de rehabilitación para las extremidades inferiores desarrollado por el Instituto

Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada (AIST) en Tsukuba. Figura 7(c), tiene múltiples grados de libertad y utiliza un mecanismo accionado por cable (49).

Resultados

En este estudio se presenta una tabla de clasificación elaborada sistemáticamente de las plataformas robóticas más representativas para la rehabilitación y asistencia a la marcha (ver Ficha Complementaria: Tabla 1). El proceso de clasificación duró aproximadamente dos años y fue incluido en la tesis doctoral de González-Mejía (14).

Ficha complementaria: Tabla 1.

Disponibilidad de datos: La información generada y analizada durante este estudio está disponible en el repositorio Open Science Framework - <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/RQHFZ>

Formato de archivo: pdf.

Título: Rehabilitación de plataformas robóticas. Los sistemas robóticos para la rehabilitación asistida de la marcha humana pueden denominarse plataformas o asistentes robóticos, que se agrupan según el principio de rehabilitación: asistentes de cinta de correr, asistentes basados en reposapiés, asistentes móviles y asistentes estacionarios.

Descripción: La tabla de clasificación se basa en un conjunto cuidadosamente seleccionado de variables de comparación, con el objetivo de proporcionar un análisis estructurado y detallado de las características clave de cada plataforma, tales como:

Sistemas robóticos para la rehabilitación de la marcha: entrenadores de marcha en cinta rodante, entrenadores de marcha basados en la placa de los pies, entrenadores de marcha sobre el suelo y entrenadores de marcha estacionarios.

Dispositivo robótico de rehabilitación

Compañía

Grado de libertad (DoF): Accionado (A), Pasivo (P o No accionado) y Rígido (R)

Profundidad de campo de la cadera: flexión/extensión, abducción/aducción y rotación externa/rotación interna

Rodilla DoF: Flexión/Extensión

Profundidad de campo del tobillo: flexión plantar/dorsiflexión, inversión/eversión, abducción/aducción, y

*Pronación/**Supinación

*Pronación: Los tres planos, movimiento aplicado basado en una combinación de: Eversión, abducción y dorsiflexión.

**Supinación: Los tres planos, movimiento aplicado basado en una combinación de: Inversión, aducción y flexión plantar.

Actuación

Soporte de Peso Corporal (BWS): Soporte de Peso Corporal (cBWS) por cable y Soporte de Peso Corporal estructural (sBWS).

Sensores

Estrategias de control

Trayectoria de los pasos

Peso del dispositivo: Unidades de ingeniería, . [Kg]

Ensayos clínicos

Estado: Etapa de investigación (R), Disponible comercialmente (C), Uso clínico (Cu), Militar (M) y

Abandonado (no hay obra en curso más de cuatro años - A).

Discusión

Aunque este artículo no discute cómo las características de las plataformas robóticas de rehabilitación para la marcha influyen en la efectividad de la rehabilitación, su relevancia y evidencia de apoyo son innegables. Las características de diseño y control de estas plataformas impactan significativamente en sus resultados terapéuticos y en la experiencia del usuario, tal y como se destaca en la literatura. Por ejemplo, el enfoque de diseño presentado en "Enfoques de diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación neuromotora humana" (109) demuestra la importancia de imitar los patrones naturales de marcha humana para apoyar la recuperación neuromotora. Al utilizar los movimientos registrados de individuos sanos, este diseño de exoesqueleto tiene como objetivo replicar un ciclo completo de marcha, promoviendo así la recuperación de la marcha para pacientes con trastornos neuromotores. Complementariamente, la revisión realizada en "Estrategias de control utilizadas en exoesqueletos de miembros inferiores para la rehabilitación de la marcha después de una lesión cerebral" (110) subraya el papel fundamental de las estrategias de control en la maximización de los resultados clínicos. Este trabajo destaca cómo los avances en los controladores robóticos durante la última década han facilitado una mejor interacción entre los exoesqueletos y los pacientes con lesiones cerebrales, aunque las estrategias óptimas para estimular la recuperación de la función motora aún están bajo investigación. En conjunto, estos estudios ilustran la interacción entre el diseño mecánico y las metodologías de control para dar forma tanto al impacto terapéutico como a la experiencia centrada en el usuario de los sistemas robóticos de rehabilitación, haciendo hincapié en la necesidad de una mayor integración de estos elementos para alinearlos con la evidencia clínica y las necesidades específicas del usuario. Además, en la tabla de clasificación (Ficha complementaria: Tabla 1) se hace referencia a artículos que presentan los resultados de ensayos clínicos realizados en las plataformas estudiadas.

El análisis descriptivo pone de manifiesto que los entrenadores de marcha sobre el suelo son actualmente los sistemas más avanzados y ampliamente empleados en el campo de la robótica de rehabilitación. Este uso generalizado refleja su capacidad para abordar los desafíos multifacéticos inherentes a la rehabilitación de la marcha, particularmente en la restauración de los patrones de movimiento naturales en personas con movilidad reducida. Estos sistemas ofrecen ventajas significativas al permitir la rehabilitación en un entorno más funcional y del mundo real, lo cual

es crucial para mejorar los resultados de los pacientes. Su papel en el proceso de rehabilitación subraya su importancia como área central de interés para la investigación y el desarrollo tecnológico en curso. Los avances continuos en los entrenadores de marcha sobre el suelo pueden conducir a terapias más personalizadas y efectivas, mejorando su potencial para adaptarse a las diversas necesidades de los pacientes con diferentes tipos de discapacidades de la marcha. Una exploración más profunda de su diseño, estrategias de control e integración con otras tecnologías de rehabilitación podría optimizar su aplicación clínica y ampliar su eficacia en diversos entornos de rehabilitación.

La necesidad de robots de rehabilitación adaptativos y personalizados pone de manifiesto una intersección crítica entre la biomecánica, la ingeniería de control y la inteligencia artificial. Uno de los principales desafíos para lograr la adaptabilidad dinámica radica en el desarrollo de algoritmos de control robustos que puedan procesar la retroalimentación biomecánica en tiempo real mientras se mantiene la estabilidad y la seguridad. El aprendizaje automático y el modelado predictivo podrían desempeñar un papel crucial en el perfeccionamiento de estas estrategias de control, permitiendo que el sistema antice los movimientos y perturbaciones del usuario en lugar de limitarse a reaccionar ante ellos. Además, la integración de tecnologías de detección multimodal, como la electromiografía (EMG) y las unidades de medición inercial (IMU), podría mejorar la capacidad del robot para evaluar las respuestas neuromusculares y adaptarse en consecuencia. Sin embargo, estos avances plantean preocupaciones adicionales, como la eficiencia computacional, la fiabilidad de los sensores y la necesidad de una amplia validación clínica para garantizar la eficacia en diversas poblaciones de pacientes. Abordar estos desafíos requerirá la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, médicos y neurocientíficos para desarrollar robots de rehabilitación que no solo sean técnicamente sofisticados, sino también clínicamente efectivos y accesibles para un uso generalizado.

Conclusiones

Este artículo proporciona una visión general completa de los antecedentes de la investigación para mejorar el conocimiento y la comprensión de los lectores sobre los sistemas robóticos para la rehabilitación asistida de la marcha humana. Se presenta una clasificación de estos sistemas, categorizados en función de los principios de rehabilitación, incluidos los asistentes basados en cintas de correr, los asistentes basados en reposapiés, los asistentes móviles y los asistentes estacionarios. La revisión adopta un enfoque descriptivo para destacar las características clave dentro de estas categorías.

El campo de la robótica de rehabilitación y asistencia es altamente multidisciplinario y abarca áreas como la biomecánica, la interacción hombre-máquina, las estrategias de control, el diseño de actuadores y la integración de sensores. Como aportación significativa, este estudio ofrece una tabla de clasificación que resume las plataformas robóticas de rehabilitación más representativas. Esta tabla destaca sus características distintivas y diferencias utilizando variables comparativas, proporcionando una referencia valiosa para investigadores y desarrolladores en el campo.

En conclusión, si bien los robots de rehabilitación actuales han demostrado un progreso significativo en la asistencia con la recuperación de la marcha, aún enfrentan desafíos considerables

para personalizar sus características físicas para satisfacer las necesidades específicas de los usuarios individuales. La variabilidad en las condiciones de los pacientes y la diversidad en las discapacidades motoras requieren robots que puedan ajustarse dinámicamente para brindar apoyo personalizado. Además, los sistemas robóticos deben diseñarse para adaptarse a las perturbaciones impredecibles inducidas por el usuario, que pueden ocurrir durante las sesiones de terapia e interferir con la eficacia del proceso de rehabilitación. Para superar estos obstáculos, el desarrollo de estrategias de control avanzadas se vuelve esencial. Estas estrategias deben garantizar interacciones fluidas y adaptables, lo que permite que el robot ajuste continuamente su soporte en función de la retroalimentación en tiempo real del usuario. Al integrar estos sistemas de adaptación, los futuros robots de rehabilitación podrían mejorar la comodidad del usuario, la seguridad y los resultados terapéuticos generales, mejorando en última instancia la calidad de la recuperación de la marcha para las personas con problemas de movilidad.

Contribuciones de los autores

Sergey González-Mejía: Investigación, Metodología, Obtención de fondos, Conceptualización, Redacción del borrador original, Redacción, revisión y edición. José M. Ramírez-Scarpetta: Metodología, Obtención de fondos, Gestión del proyecto, Redacción, revisión y edición.

Financiación

Esta publicación recibió financiación de la Universidad del Valle en el marco del proyecto "Plataforma tecnológica modular para la valoración objetiva de la marcha humana" con código C.I. 21259.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Implicaciones éticas

No aplicable

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad del Valle y del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias – Convocatoria 647).

Referencias

1. Meng W, Liu Q, Zhou Z, Ai Q, Sheng B, Xie SS. Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics* [Internet]. 2015 Oct;31:132–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.04.005>
2. Chen B, Ma H, Qin LY, Gao F, Chan KM, Law SW, et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *J Orthop Transl* [Internet]. 2016 Apr;5:26–37. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214031X15000716>
3. Díaz I, Gil JJ, Sánchez E. Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. Vol. 2011, *Journal of Robotics*. 2011. p. 1–11.

4. Galvez J, Reinkensmeyer D. Robotics for Gait Training After Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* [Internet]. 2005 Oct;11(2):18–33. Available from: <http://archive.scijournal.com/doi/abs/10.1310/DAMJ-G43A-16EH-1BDK>
5. Colombo G, Joerg M, Schreier R, Dietz V. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis. *J Rehabil Res Dev* [Internet]. 2000;37(6):693–700. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11321005>
6. Freivogel S, Mehrholz J, Husak-Sotomayor T, Schmalohr D. Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study. *Brain Inj* [Internet]. 2008 Jan;22(7–8):625–32. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02699050801941771>
7. West RG. Powered gait orthosis and method of utilizing same [Internet]. Vol. 1, US Patent US006689075B2. United States; 2006. Available from: <https://patents.google.com/patent/US6689075B2/en>
8. P&S Mechanics Co. Ltd. WALKBOT Exoskeleton gait training robot [Internet]. 2024 [cited 2024 Aug 1]. Available from: <https://www.walkbot.co.kr/en/sub/product-introduction.php>
9. Wyss D, Vallery H, Hocoma AG. Gait Rehabilitation Robot (Lokomat). Zurich, Switzerland: ETH Zurich; 2012 [cited 2015 Sep 30]. Sensory-Motor Systems Lab. Available from: <https://sms.hest.ethz.ch/research/past-research-projects/lower-limb-exoskeletons-and-exosuits/lokomat-gait-rehabilitation-robot.html>
10. Marchal-Crespo L, Riener R. Technology of the Robotic Gait Orthosis Lokomat. In: Reinkensmeyer DJ, Marchal-Crespo L, Dietz V, editors. *Neurorehabilitation Technology* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2022. p. 665–81. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-031-08995-4_29
11. Freivogel S, Mehrholz J, Husak-Sotomayor T, Schmalohr D. Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study. *Brain Inj*. 2008;22(7–8):625–32.
12. Motorika. ReoAmbulator Robotic Gait Training Device [Internet]. 2012 [cited 2015 Sep 30]. Available from: https://exoskeletonreport.com/product/reoambulator/#google_vignette
13. Olmos-Gómez R, Calvo-Muñoz I, Gómez-Conesa A. Treatment with robot-assisted gait trainer Walkbot along with physiotherapy vs. isolated physiotherapy in children and adolescents with cerebral palsy. Experimental study. *BMC Neurol* [Internet]. 2024 Jul 15;24(1):245. Available from: <https://bmcnurology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12883-024-03750-9>
14. González-Mejía S. Partial Assistance Control on a Robotic Platform with an Exoskeleton for the Human Gait Rehabilitation [Internet]. Doctoral thesis, Universidad del Valle; 2023. Available from: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/J7XFH>
15. GICI. Industrial Control Research Group - Universidad del Valle [Internet]. 2022 [cited 2022 Aug 14]. Available from: <https://gici.univalle.edu.co/>

16. González-Mejía S, Ramírez JM. Gait Assisted Rehabilitation Platform – RUVEM. In: IX Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad Iberdiscap [Internet]. Bogotá DC.; 2017. p. 1–8. Available from: <https://reasiste.umh.es/portfolio/iberdiscap-2017/>
17. Echeverri EM, González-Mejía S, Ramírez JM, Rosero E. Plataforma de rehabilitación asistida para marcha - RUVEM: Integración de los subsistemas de soporte. In: X Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad Iberdiscap [Internet]. Buenos Aires, Argentina; 2019. Available from: <https://reasiste.umh.es/portfolio/iberdiscap-2019/>
18. Loaiza A, Rosero E, Ramírez JM. Active body weight support system for lower limb rehabilitation. In: VIII Jornadas AITADIS de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad [Internet]. México; 2018. Available from: <https://www.aitadis.org/wp/934-2/>
19. Loaiza AE, Garcia JI, Buitrago JT. Development of a Body Weight Support System Employing Model-Based System Engineering Methodology. Technologies [Internet]. 2024 Jul 23;12(8):118. Available from: <https://www.mdpi.com/2227-7080/12/8/118>
20. Reinkensmeyer D, Wynne JH, Harkema SJ. A robotic tool for studying locomotor adaptation and rehabilitation. Proc Second Jt 24th Annu Conf Annu Fall Meet Biomed Eng Soc [Engineering Med Biol. 2002;3:2353–4.
21. Reinkensmeyer DJ, Aoyagi D, Emken JL, Galvez J a, Ichinose W, Kerdanyan G, et al. Tools for understanding and optimizing robotic gait training. J Rehabil Res Dev. 2006;43(5):657–70.
22. Banala SK, Agrawal SK, Scholz JP. Active Leg Exoskeleton (ALEX) for gait rehabilitation of motor-impaired patients. 2007 IEEE 10th Int Conf Rehabil Robot ICORR'07. 2007;00(c):401–7.
23. Veneman JF, Kruidhof R, Hekman EEG, Ekkelenkamp R, Van Asseldonk EHF, Van Der Kooij H. Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2007;15(1):379–86.
24. Beyl P, Van Damme M, Van Ham R, Versluys R, Vanderborght B, Lefeber D. An exoskeleton for gait rehabilitation: Prototype design and control principle. Proc - IEEE Int Conf Robot Autom. 2008;2037–42.
25. Pietrusinski M, Cajigas I, Mizikacioglu Y, Goldsmith M, Bonato P, Mavroidis C. Gait rehabilitation therapy using robot generated force fields applied at the pelvis. 2010 IEEE Haptics Symp HAPTICS 2010. 2010;401–7.
26. Surdilovic D, Bernhardt R. STRING-MAN: a new wire robot for gait rehabilitation. IEEE Int Conf Robot Autom 2004 Proceedings ICRA '04 2004. 2004;2:2031–6.
27. Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait. J Rehabil Res Dev [Internet]. 2000;37(6):701–8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11321006/>
28. Yano H, Tamefusa S, Tanaka N, Saitou H, Iwata H. Gait rehabilitation system for stair climbing and descending. In: 2010 IEEE Haptics Symposium [Internet]. IEEE; 2010. p. 393–400. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5444627>
29. Schmidt H, Hesse S, Bernhardt R, Krüger J. HapticWalker a novel haptic foot device. ACM Trans Appl Percept [Internet]. 2005 Apr 1;2(2):166-80 <https://doi.org/10.1109/TAP.2005.846000>

- HAPTIC.2010.5444627.
30. Schmidt H. HapticWalker - A novel haptic device for walking simulation. In: Proceedings of the EuroHaptics Conference [Internet]. Munich, Germany; 2004. p. 60–7. Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1060581.1060589>
 31. Chen S, Wang Y, Li S, Wang G, Huang Y, Mao X. Lower limb rehabilitation robot. In: 2009 ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots [Internet]. London: IEEE; 2009. p. 439–43. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5173866>
 32. Yoon J, Novandy B, Yoon CH, Park KJ. A 6-DOF gait rehabilitation robot with upper and lower limb connections that allows walking velocity updates on various terrains. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*. 2010;15(2):201–15.
 33. Peshkin M, Brown D a., Santos-Munné JJ, Makhlin A, Lewis E, Colgate JE, et al. KineAssist: A robotic overground gait and balance training device. *Proc 2005 IEEE 9th Int Conf Rehabil Robot*. 2005;2005:241–6.
 34. Bouri M, Stauffer Y, Schmitt C, Allemand Y, Gnemmi S, Clavel R, et al. The WalkTrainerTM: A Robotic system for walking rehabilitation. *2006 IEEE Int Conf Robot Biomimetics, ROBIO 2006*. 2006;1616–21.
 35. Goffer A. Gait-locomotor apparatus [Internet]. Google Patents; US7153242, 2006. Available from: <http://www.google.com/patents/US7153242>
 36. Kawamoto H, Suwoong Lee, Kanbe S, Sankai Y. Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller. In: SMC'03 Conference Proceedings 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics Conference Theme - System Security and Assurance (Cat No03CH37483) [Internet]. IEEE; 2003. p. 1648–53. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1244649>
 37. ABLE Human Motion S.L. ABLE Human Motion Exoskeleton | Backed by leading clinical institutions [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 26]. Available from: <https://www.ablehumanmotion.com/able-human-motion-exoskeleton/>
 38. Pillai M V., Van Engelhoven L, Kazerooni H. Evaluation of a Lower Leg Support Exoskeleton on Floor and Below Hip Height Panel Work. *Hum Factors J Hum Factors Ergon Soc* [Internet]. 2020 May 9;62(3):489–500. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720820907752>
 39. SuitX. Phoenix | suitX [Internet]. 2017 [cited 2022 Jul 26]. Available from: <https://www.suitx.com/phoenix-medical-exoskeleton>
 40. Allemand Y, Stauffer Y, Clavel R, Brodard R. Design of a new lower extremity orthosis for overground gait training with the WalkTrainer. In: 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [Internet]. IEEE; 2009. p. 550–5. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5209585>
 41. Kawamoto H, Sankai Y. Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person. *Comput Help*

- people with Spec needs [Internet]. 2002;196–203. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Anne-Marie-Burn-2/publication/221009609_TeDUB_A_System_for_Presenting_and_Exploring_Technical_Drawings_for_Blind_People/links/5b8e5c9b45851540d1c50da4/TeDUB-A-System-for-Presenting-and-Exploring-Technical-Drawings-for-Blind-People.pdf#page=219
42. Seo KH, Lee JJ. The development of two mobile gait rehabilitation systems. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2009;17(2):156–66.
43. Technaid S.L. Robotic Exoskeleton Exo-H3 [Internet]. 2021 [cited 2022 Aug 16]. Available from: <https://www.technaid.com/products/robotic-exoskeleton-exo-exoesqueleto-h3/>
44. Exoskeleton Report LLC. Exoskeleton Catalog Archives - Exoskeleton Report [Internet]. 2021 [cited 2022 Jul 26]. Available from: <https://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/>
45. Rodríguez-Fernández A, Lobo-Prat J, Font-Llagunes JM. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments. *J Neuroeng Rehabil [Internet]*. 2021 Dec 1;18(1):22. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00815-5>
46. Tijjani I, Kumar S, Boukheddimi M. A Survey on Design and Control of Lower Extremity Exoskeletons for Bipedal Walking. *Appl Sci [Internet]*. 2022 Feb 25;12(5):2395. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2395>
47. Schmitt C, Métrailler P, Al-Khodairy A, Brodard R, Fournier J, Bouri M, et al. The MotionMaker: a Rehabilitation System Combining an Orthosis With Closed Loop Electrical Muscle Stimulation. In: 8 Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation [Internet]. 2004. p. 117–20. Available from: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/2a6ab0ca-0013-4bbb-a3bd-55d11fb5418b/statistics>
48. Bouri M, Le Gall B, Clavel R. A new concept of parallel robot for rehabilitation and fitness: The Lambda. 2009 IEEE Int Conf Robot Biomimetics, ROBIO 2009. 2009;2503–8.
49. Homma K, Fukuda O, Sugawara J, Nagata Y, Usuba M. A wire-driven leg rehabilitation system: development of a 4-DOF experimental system. In: Advanced Intelligent Mechatronics, 2003 AIM 2003 Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on [Internet]. 2003. p. 908–13. Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1225463%5Cn10.1109/AM.2003.1225463%5CnA wire-driven leg rehabilitation system-development of a 4-DOF experimental system \(2\).pdf](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1225463%5Cn10.1109/AM.2003.1225463%5CnA wire-driven leg rehabilitation system-development of a 4-DOF experimental system (2).pdf)
50. Colombo G, Wirz M, Dietz V. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients. *Spinal Cord [Internet]*. 2001 May;39(5):252–5. Available from: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/sj.sc.3101154>
51. Wirz M, Zemon DH, Rupp R, Scheel A, Colombo G, Dietz V, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: A multicenter trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86(4):672–80.
52. Hornby TG, Zemon DH, Campbell D. Robotic-assisted, body-weight-supported treadmill

- training in individuals following motor incomplete spinal cord injury. *Phys Ther.* 2005;85(1):52–66.
53. Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, Brady K, Campbell DD, Kahn JH, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke. *Neurorehabil Neural Repair.* 2009;23(1):5–13.
54. Westlake KP, Patten C. Pilot study of Lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke. *J Neuroeng Rehabil.* 2009;6:18.
55. Mehrholz J, Pohl M. Electromechanical-Assisted Gait Training After Stroke: A Systematic Review Comparing End-Effect and Exoskeleton Devices. *J Rehabil Med [Internet].* 2012;44(3):193–9. <https://doi.org/10.2340/16501977-0943>
56. Freivogel S, Schmalohr D, Mehrholz J. Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electromechanical gait device. *J Rehabil Med.* 2009;41(9):734–9.
57. Fisher S. Use of Autoambulator for mobility improvement in patients with central nervous system (CNS) injury or disease. In: *Neurorehabilitation and neural repair.* 2008. p. 556.
58. Fisher S, Lucas L, Adam Thrasher T. Robot-Assisted Gait Training for Patients with Hemiparesis Due to Stroke. *Top Stroke Rehabil [Internet].* 2011 May;18(3):269–76. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21642064>
59. Emken JL, Wynne JH, Harkema SJ, Reinkensmeyer DJ. A robotic device for manipulating human stepping. *IEEE Trans Robot [Internet].* 2006 Feb;22(1):185–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1589012>
60. Emken JL, Harkema SJ, Beres-Jones J a, Ferreira CK, Reinkensmeyer DJ. Feasibility of manual teach-and-replay and continuous impedance shaping for robotic locomotor training following spinal cord injury. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2008;55(1):322–34.
61. Ichinose WE, Reinkensmeyer DJ, Aoyagi D, Lin JT, Ngai K, Edgerton VR, et al. A robotic device for measuring and controlling pelvic motion during locomotor rehabilitation. In: *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat No03CH37439) [Internet].* IEEE; 2003. p. 1690–3. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2003.1279715>
62. Aoyagi D, Ichinose WE, Reinkensmeyer DJ, Bobrow JE. Human Step Rehabilitation Using a Robot Attached to the Pelvis. In: *Dynamic Systems and Control, Parts A and B [Internet].* ASME; 2004. p. 443–9. Available from: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1652235>
63. Aoyagi D, Ichinose WE, Harkema SJ, Reinkensmeyer DJ, Bobrow JE. An Assistive Robotic Device That Can Synchronize to the Pelvic Motion During Human Gait Training. In: *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005 ICORR 2005 [Internet].* IEEE; 2005. p. 565–8. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1502026>
64. Zanotto D, Stegall P, Agrawal SK. ALEX III: A novel robotic platform with 12 DOFs for human

- gait training. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation [Internet]. IEEE; 2013. p. 3914–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6631128>
65. Banala SK, Kim SH, Agrawal SK, Scholz JP. Robot assisted gait training with active leg exoskeleton (ALEX). *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* [Internet]. 2009 Feb;17(1):2–8. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19211317>
66. Fleerkotte BM, Koopman B, Buurke JH, van Asseldonk EHF, van der Kooij H, Rietman JS. The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: an explorative study. *J Neuroeng Rehabil* [Internet]. 2014;11(1):26. Available from: <http://www.jneuroengrehab.com/content/11/1/26>
67. Asseldonk E van, Simons C, Folkersman M. Robot aided gait training according to the assist-as-needed principle in chronic stroke survivors. In: Proceedings of the Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Poster). Chicago, Ill, USA; 2009.
68. Beyl P, Naudet J, Van Ham R, Lefebvre D. Mechanical Design of an Active Knee Orthosis for Gait Rehabilitation. In: 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics [Internet]. IEEE; 2007. p. 100–5. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4428413>
69. Surdilovic D, Zhang J, Bernhardt R. STRING-MAN: Wire-robot technology for safe, flexible and human-friendly gait rehabilitation. 2007 IEEE 10th Int Conf Rehabil Robot ICORR'07. 2007;00(c):446–53.
70. Werner C, Von Frankenberg S, Treig T, Konrad M, Hesse S. Treadmill training with partial body weight support and an electromechanical gait trainer for restoration of gait in subacute stroke patients: a randomized crossover study. *Stroke* [Internet]. 2002 Dec;33(12):2895–901. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12468788>
71. Pohl M, Werner C, Holzgraefe M, Kroczeck G, Mehrholz J, Wingendorf I, et al. Repetitive locomotor training and physiotherapy improve walking and basic activities of daily living after stroke: a single-blind, randomized multicentre trial (DEutsche GAngrainerStudie, DEGAS). *Clin Rehabil*. 2007;21(1):17–27.
72. Peurala SH, Airaksinen O, Huuskonen P, Jäkälä P, Juhakoski M, Sandell K, et al. Effects of intensive therapy using gait trainer or floor walking exercises early after stroke. *J Rehabil Med*. 2009;41(3):166–73.
73. Schmidt H, Krüger J, Hesse S. HapticWalker - Haptic foot device for gait rehabilitation. In: *Human Haptic Perception: Basics and Applications* [Internet]. Birkhauser Verlag AG; 2008. p. 501–11. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84918789024&partnerID=40&md5=8d69ec54de484a78d8b3f8334f6923de>
74. Hesse S, Werner C. Connecting research to the needs of patients and clinicians. *Brain Res Bull*. 2009;78(1):26–34.

75. Frey M, Colombo G, Vaglio M, Bucher R, Jorg M, Riener R. A Novel Mechatronic Body Weight Support System. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* [Internet]. 2006 Sep;14(3):311–21. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1703563>
76. Evolution Fitness Brasil. Elíptico Orbital Evolution Sportop E 450 [Internet]. 2013 [cited 2015 Sep 30]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=MLAnTb8VvM4>
77. Evolution Fitness. Elíptico eletrônico evolution [Internet]. 2013 [cited 2015 Nov 24]. Available from: <https://www.evolutionfitness.co/product-category/cardio/elipticas/page/2?srsltid=AfmBOood41wVx-SGYCCKz7xoDx1MSHibu3qVEjV0zx7zDGUM8NQZBbtF>
78. Wang S, Wang L, Meijneke C, van Asseldonk E, Hoellinger T, Cheron G, et al. Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* [Internet]. 2015 Mar;23(2):277–86. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6940308>
79. Burgess JK, Weibel GC, Brown D a. Overground walking speed changes when subjected to body weight support conditions for nonimpaired and post stroke individuals. *J Neuroeng Rehabil* [Internet]. 2010;7(1):6. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2827418/>
80. Allemand Y, Stauffer Y. Overground Gait Rehabilitation: First Clinical Investigation with the WalkTrainer. In: Proceedings of the European Conference on Technically Assisted Rehabilitation, (TAR '09). Berlin, Germany; 2009.
81. Suzuki K, Kawamura Y, Hayashi T, Sakurai T, Hasegawa Y, Sankai Y. Intention-based walking support for paraplegia patient. In: Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [Internet]. 2005. p. 2707–13. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-27944501048&partnerID=tZOTx3y1>
82. Kawamoto H, Hayashi T, Sakurai T, Eguchi K, Sankai Y. Development of single leg version of HAL for hemiplegia. *Proc 31st Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc Eng Futur Biomed EMBC* 2009. 2009;5038–43.
83. Strausser KA, Swift TA, Zoss AB, Kazerooni H. Prototype Medical Exoskeleton for Paraplegic Mobility: First Experimental Results. In: ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, Volume 1 [Internet]. ASME; 2010. p. 453–8. Available from: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1613452>
84. Swift TA, Strausser KA, Zoss AB, Kazerooni H. Control and Experimental Results for Post Stroke Gait Rehabilitation With a Prototype Mobile Medical Exoskeleton. In: ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, Volume 1 [Internet]. ASME; 2010. p. 405–11. Available from: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1613434>
85. Rex Bionics. Rex Bionics - Our Products [Internet]. 2015 [cited 2015 Nov 6]. Available from: <https://www.rexbionics.com/product-information/>

86. Maxon motor. Robotic exoskeleton: For a better quality of life [Internet]. 2013 [cited 2015 Nov 25]. p. 1–4. Available from: http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8808028438558/2013-01-en-exoskeleton.pdf?attachment=true
87. MORI Y, TANIGUCHI T, INOUE K, FUKUOKA Y, SHIROMA N. Development of a Standing Style Transfer System ABLE with Novel Crutches for a Person with Disabled Lower Limbs. *J Syst Des Dyn* [Internet]. 2011;5(1):83–93. Available from: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/jsdd/5.83?from=CrossRef>
88. Kong K, Moon H, Hwang B, Jeon D, Tomizuka M. Impedance compensation of SUBAR for back-drivable force-mode actuation. *IEEE Trans Robot*. 2009;25(3):512–21.
89. Chen F, Yu Y, Ge Y, Sun J, Deng X. WPAL for Human Power Assist during Walking Using Pseudo-compliance Control. In: 2007 International Conference on Mechatronics and Automation [Internet]. IEEE; 2007. p. 2172–6. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4303888>
90. Cao H, Ling Z, Zhu J, Wang Y, Wang W. Design frame of a leg exoskeleton for load-carrying augmentation. 2009 IEEE Int Conf Robot Biomimetics, ROBIO 2009. 2009;426–31.
91. Kiguchi K, Imada Y. EMG-based control for lower-limb power-assist exoskeletons. 2009 IEEE Work Robot Intell Informationally Struct Space, RiSS 2009 - Proc. 2009;19–24.
92. Kwa HK, Noorden JH, Missel M, Craig T, Pratt JE, Neuhaus PD. Development of the IHMC mobility assist exoskeleton. In: Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. p. 2556–62.
93. Hayashi Y, Kiguchi K. A lower-limb power-assist robot with perception-assist. In: Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. 2011. p. 1–6.
94. Quintero HA, Farris RJ, Goldfarb M. Control and implementation of a powered lower limb orthosis to aid walking in paraplegic individuals. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [Internet]. IEEE; 2011. p. 1–6. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5975481>
95. Lim HB, Hoon KH, Soh YC, Tow A, Low KH. Gait planning for effective rehabilitation - From gait study to application in clinical rehabilitation. In: 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [Internet]. IEEE; 2009. p. 271–6. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5209599>
96. Safizadeh MR, Hussein M, Yaacob MS, Md Zain MZ, Abdullah MR, Che Kob MS, et al. Kinematic analysis of powered lower limb Orthoses for gait rehabilitation of hemiplegic and hemiparetic patients. *Int J Math Model Methods Appl Sci*. 2011;5(3):490–8.
97. Slavnic S, Leu A, Ristic-Durrant D, Graser A. Concept of a mobile robot-assisted gait rehabilitation system - simulation study. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [Internet]. IEEE; 2010. p. 6022–7. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5649133>
98. Saito Y, Kikuchi K, Negoto H, Oshima T, Haneyoshi T. Development of Externally Powered Lower Limb Orthosis with Bilateral-Servo Actuator. In: 9th International Conference on

- Rehabilitation Robotics, 2005 ICORR 2005 [Internet]. IEEE; 2005. p. 394–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1501127>
99. Costa N, Caldwell DG. Control of a Biomimetic "Soft-actuated" 10DoF Lower Body Exoskeleton. In: The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006 BioRob 2006 [Internet]. IEEE; 2006. p. 495–501. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1639137>
100. Zabaleta H, Bureau M, Eizmendi G, Olaiz E, Medina J, Perez M. Exoskeleton design for functional rehabilitation in patients with neurological disorders and stroke. In: 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics [Internet]. IEEE; 2007. p. 112–8. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4428415>
101. Honda. Walking Assist Device with Bodyweight Support Assist [Internet]. 2009 [cited 2015 Nov 6]. Available from: <https://www.honda.mx/movilidad#bodyWeight>
102. Honda. Walking Assist Device with Stride Management Assist [Internet]. 2009 [cited 2015 Nov 6]. Available from: <https://global.honda/en/newsroom/news/2012/c120729eng.html>
103. Low KH, Yin Y. An integrated lower exoskeleton system towards design of a portable active orthotic device. *Int J Robot Autom* [Internet]. 2007;22(1):32–43. Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1739807.1739811>
104. Xiaopeng Liu, Low KH, Hao Yong Yu. Development of a lower extremity exoskeleton for human performance enhancement. In: 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [Internet]. Sendai, Japan: IEEE; 2004. p. 3889–94. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1390021>
105. Zoss AB, Kazerooni H, Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Trans Mechatronics* [Internet]. 2006 Apr;11(2):128–38. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1618670>
106. Technaid S.L. Exo-H3 Main Features [Internet]. 2021 [cited 2022 Aug 21]. Available from: www.technaid.com-info@technaid.com
107. Technaid - Leading Motion. Exoesqueleto Exo-H3 [Internet]. 2020 [cited 2020 Jul 28]. Available from: <https://www.technaid.com/es/productos/robotic-exoskeleton-exo-h3/>
108. Gil-Castillo J, Barria P, Aguilar Cárdenas R, Baleta Abarza K, Andrade Gallardo A, Biskupovic Mancilla A, et al. A Robot-Assisted Therapy to Increase Muscle Strength in Hemiplegic Gait Rehabilitation. *Front Neurorobot* [Internet]. 2022 Apr 29;16. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2022.837494/full>
109. Copilusi C, Dumitru S, Geonea I, Ciurezu LG, Dumitru N. Design Approaches of an Exoskeleton for Human Neuromotor Rehabilitation. *Appl Sci* [Internet]. 2022 Apr 13;12(8):3952. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/8/3952>
110. de Miguel-Fernández J, Lobo-Prat J, Prinsen E, Font-Llagunes JM, Marchal-Crespo L. Control strategies used in lower limb exoskeletons for gait rehabilitation after brain injury: a systematic review and analysis of clinical effectiveness. *J Neuroeng Rehabil* [Internet]. 2023 Feb 19;20(1):23. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01144-5>