

Estado del arte en el uso de robots para la rehabilitación del tobillo: Avances y desafíos

C. H. Guzmán-Valdivia¹ y A. Blanco-Ortega²

¹Universidad Politécnica de Aguascalientes, Av. Paseo San Gerardo 207, San Gerardo C.P.20342 Aguascalientes, Ags., México, cesar.guzman@upa.edu.mx

²TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. andres.bo@cenidet.tecnm.mx

Resumen

Este artículo presenta una revisión exhaustiva del estado del arte en la rehabilitación robótica del tobillo, enfocándose en los principales avances tecnológicos y los desafíos que aún persisten en este campo. Este estudio se basa en una revisión sistemática de la literatura, considerando artículos publicados en bases de datos indexadas como Scopus, IEEE Xplore y PubMed, con criterios de inclusión y exclusión definidos. Se analizan las dos categorías principales de dispositivos robóticos: los exoesqueletos y los robots basados en plataformas, destacando su evolución, ventajas y limitaciones. Además, se discuten las futuras tendencias que están transformando la rehabilitación del tobillo, incluyendo el uso de inteligencia artificial, la robótica blanda, la tele-rehabilitación, la realidad virtual y la impresión 3D, todas ellas encaminadas a mejorar la personalización, accesibilidad y eficacia de los tratamientos. Finalmente, se subrayan los retos técnicos, clínicos y económicos que deben abordarse para lograr una adopción más amplia de estas tecnologías, especialmente en el entorno de la rehabilitación a domicilio.

Palabras clave— Rehabilitación robótica del tobillo, exoesqueletos, robots basados en plataformas, fisioterapia.

Abstract

This article provides a comprehensive review of the state of the art in robotic ankle rehabilitation, focusing on major technological advances and the challenges that still remain in the field. This study is based on a systematic literature review, considering articles published in indexed databases such as Scopus, IEEE Xplore, and PubMed, with defined inclusion and exclusion criteria. It examines the two main categories of robotic devices: exoskeletons and platform-based robots, highlighting their evolution, advantages, and limitations. Furthermore, future trends transforming ankle rehabilitation are discussed, including the use of artificial intelligence, soft robotics, tele-rehabilitation, virtual reality, and 3D printing, all aimed at improving the personalization, accessibility, and effectiveness of treatments. Finally, the article emphasizes the technical, clinical, and economic challenges that must be addressed to achieve broader adoption of these technologies, especially in home rehabilitation settings.

Keywords— Robotic ankle rehabilitation, exoskeletons, platform-based robots, physiotherapy.

I. INTRODUCCIÓN

El tobillo es una articulación compleja y fundamental para la locomoción, y debido a su importancia en la biomecánica del cuerpo, es particularmente vulnerable a las lesiones [1]. Las patologías más comunes que afectan esta articulación incluyen esguinces, fracturas, y disfunciones neurológicas como el pie caído [2]. Los esguinces son las lesiones más frecuentes y ocurren cuando el tobillo se mueve más allá de su rango funcional, afectando tanto a atletas como a personas sedentarias [3]. Condiciones como el pie caído, caracterizado por una debilidad significativa en la dorsiflexión del pie, y fracturas de huesos relacionados, como el astrágalo y el calcáneo, representan desafíos considerables en la rehabilitación [4]. Otras causas comunes de discapacidad en el tobillo incluyen los accidentes cerebrovasculares, lesiones medulares y parálisis, lo que convierte al tobillo en una de las articulaciones que más frecuentemente requiere rehabilitación prolongada [5].

En la rehabilitación del tobillo, los ejercicios recomendados suelen depender de la gravedad de la lesión y el estado físico del paciente. Existen diferentes modalidades de terapia que se

dividen en tres categorías principales: pasiva, activa asistida y activa [6]. En los ejercicios pasivos, el fisioterapeuta mueve la articulación del paciente sin que este ejerza esfuerzo alguno. En la terapia activa asistida, el paciente colabora parcialmente en los movimientos, con la ayuda del terapeuta o de dispositivos mecánicos. Los ejercicios activos implican la participación plena del paciente, quien realiza movimientos voluntarios para fortalecer la musculatura y mejorar la amplitud de movimiento.

Uno de los principales desafíos en la rehabilitación del tobillo radica en la naturaleza prolongada y repetitiva de los tratamientos [7]. Para ser efectivos, los programas de rehabilitación requieren que los pacientes se sometan a ejercicios intensivos y frecuentes, lo que puede resultar en agotamiento físico y emocional, tanto para los pacientes como para los fisioterapeutas. Además, la falta de recursos, como tiempo y acceso regular a terapia especializada, puede comprometer la efectividad de la rehabilitación [8]. Las terapias convencionales también dependen en gran medida de la experiencia del terapeuta, lo que introduce una variabilidad en el progreso del paciente. Asimismo, la monotonía de algunos ejercicios puede reducir la motivación del paciente, dificultando su adherencia a los programas de tratamiento [9].

Para pacientes con limitaciones de tiempo o recursos, la rehabilitación en el hogar se ha vuelto una opción viable, pero con ciertos desafíos [10]. Los dispositivos utilizados en casa, como bandas de resistencia, tableros de equilibrio y rodillos de espuma, son herramientas comunes que permiten a los pacientes realizar ejercicios básicos. Sin embargo, estos dispositivos carecen de interactividad y no ofrecen retroalimentación precisa sobre el progreso del paciente, lo que dificulta la personalización de las terapias. Además, algunos ejercicios requieren posiciones o movimientos específicos que no siempre son fáciles de replicar sin la supervisión de un profesional. A pesar de sus limitaciones, la rehabilitación en el hogar puede complementar los tratamientos en clínica, pero su éxito depende en gran medida de la dedicación del paciente y la disponibilidad de herramientas adecuadas [11].

El uso de robots en la rehabilitación del tobillo ofrece una serie de ventajas sobre los métodos convencionales [12]. Los robots pueden proporcionar movimientos repetitivos y controlados con alta precisión, permitiendo a los pacientes realizar ejercicios de manera más eficiente y sin el agotamiento de los fisioterapeutas [13]. Además, los robots pueden registrar datos detallados sobre el progreso del paciente, como la velocidad de los movimientos, el rango de movimiento (ROM) alcanzado y la fuerza ejercida [14]. Esta información permite personalizar las terapias y ajustar los programas de rehabilitación en tiempo real, optimizando el proceso de recuperación [15]. Además, algunos dispositivos robóticos están integrados con tecnologías como la realidad virtual (RV), lo que no solo hace que los ejercicios sean más atractivos, sino que también mejora la motivación del paciente [16].

Este artículo ofrece una revisión exhaustiva del estado del arte en el uso de robots para la rehabilitación del tobillo, destacando los avances recientes y los desafíos técnicos y clínicos que aún persisten. A través del análisis de diferentes tecnologías robóticas, este trabajo busca proporcionar una visión clara de cómo estas herramientas están transformando el panorama de la fisioterapia y qué áreas requieren más investigación para lograr su integración plena en la rehabilitación del tobillo. Con ello, se espera contribuir a la comprensión de las oportunidades que ofrecen los robots en la mejora de la calidad de vida de los pacientes con disfunciones del tobillo, así como a la identificación de futuras direcciones de investigación en este campo.

II. BIOMECÁNICA DEL TOBILLO

El tobillo es una de las articulaciones más complejas del cuerpo humano, ya que está compuesto por dos articulaciones principales: la tibiotalar, que es responsable de los movimientos de dorsiflexión y plantarflexión, y la subtalar, que facilita los movimientos de eversión e inversión [17], ver Fig. 1. En el plano sagital, la dorsiflexión se refiere a la elevación del pie hacia la pierna, mientras que la plantarflexión consiste en el movimiento opuesto, es decir, hacia abajo. En el plano frontal, la eversión implica mover la planta del pie hacia afuera, y la inversión hacia adentro. Los movimientos de abducción y aducción ocurren en el plano horizontal, afectando el giro lateral o medial del pie, ver Fig. 2.



Fig. 1. Articulación de tobillo.

Los músculos clave que intervienen en estos movimientos incluyen los gastrocnemios y el sóleo, que son responsables de la flexión plantar, y el tibial anterior, que facilita la dorsiflexión [18]. Los tendones, como el de Aquiles, juegan un papel crucial en la transmisión de la fuerza muscular al movimiento del pie, permitiendo acciones esenciales para caminar, correr y mantener el equilibrio [19]. La complejidad de estos movimientos y estructuras hace que el tobillo sea un foco importante en el diseño de dispositivos médicos para rehabilitación [20, 21].



Fig. 2. Movimientos del tobillo.

Los robots diseñados para la rehabilitación del tobillo, como los exoesqueletos [22] y las plataformas de rehabilitación [23], deben ser capaces de adaptarse a las variaciones individuales en la biomecánica del tobillo, ya que cada paciente puede tener diferentes grados de movilidad o restricciones. El uso de sensores avanzados para medir la fuerza, la velocidad y el ROM es crucial para ajustar el tratamiento en tiempo real en cada terapia [24]. Al permitir movimientos controlados y repetitivos, los dispositivos robóticos para rehabilitación de tobillo ayudan a los pacientes a recuperar fuerza, coordinación y propiocepción de manera más eficiente que las terapias convencionales [25].

III. METODOLOGÍA

Este estudio se realizó mediante una revisión sistemática de la literatura en el ámbito de la rehabilitación robótica del tobillo. Para la recopilación de información, se consultaron bases de datos indexadas de alto impacto, incluyendo Scopus, IEEE Xplore y PubMed. Se emplearon términos de búsqueda específicos como 'robotic ankle rehabilitation', 'ankle exoskeletons' y 'platform-based rehabilitation robots'. Se definieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar la relevancia y calidad de las fuentes, considerando únicamente estudios publicados en los últimos diez años, revisados por pares y con un enfoque explícito en tecnologías aplicadas a la

rehabilitación del tobillo. La aplicación de esta metodología permite garantizar la validez, solidez y replicabilidad de los hallazgos expuestos en este artículo.

IV. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS DE REHABILITACIÓN DE TOBILLO

Los dispositivos robóticos para la rehabilitación del tobillo se pueden clasificar en dos categorías principales: exoesqueletos o dispositivos tipo ortesis activas, y robots basados en plataformas.

A. Exoesqueletos

Los exoesqueletos o ortesis activas han evolucionado significativamente desde sus primeros desarrollos en la década de 1930, cuando se comenzaron a crear dispositivos básicos para la rehabilitación de las articulaciones de las extremidades inferiores, específicamente para la rodilla [26]. La investigación en el campo de los exoesqueletos se aceleró en las décadas de 1960 y 1970, cuando se desarrollaron los primeros exoesqueletos completos, como el Hardiman [27], un sistema diseñado para aumentar la fuerza humana, aunque sus aplicaciones iniciales se enfocaron más en el ámbito militar que en la rehabilitación médica [28, 29].

El AnkleBot [30], desarrollado por el MIT, es un ejemplo sobresaliente de los exoesqueletos diseñados específicamente para la rehabilitación del tobillo, ver Fig. 2. Este dispositivo está diseñado para proporcionar asistencia en los movimientos de dorsiflexión, plantarflexión, inversión y eversión del tobillo. El AnkleBot utiliza actuadores eléctricos para proporcionar una fuerza precisa, y su estructura es lo suficientemente liviana como para permitir al paciente caminar mientras usa el dispositivo [31]. Los estudios clínicos han demostrado que el AnkleBot puede mejorar significativamente la movilidad del tobillo en pacientes con lesiones neurológicas [32].



Fig. 2. AnkleBot.

El LOPES es otro exoesqueleto importante en el campo de la rehabilitación, inicialmente fue desarrollado para ayudar en la rehabilitación de la marcha en pacientes con limitaciones en la marcha [33]. Aunque no fue diseñado específicamente para el tobillo, sus versiones más recientes han incluido componentes para asistir en la rehabilitación de esta articulación, ver Fig. 3. El LOPES utiliza cables Bowden para transmitir fuerzas a través de motores colocados fuera del dispositivo, lo que reduce el peso del exoesqueleto y permite una mayor libertad de movimiento [34].



Fig. 3. LOPES.

Los exoesqueletos que emplean actuadores neumáticos, como los músculos artificiales de McKibben, han ganado popularidad en los últimos años debido a su ligereza y capacidad para generar movimientos más naturales [35]. Los actuadores neumáticos permiten que los dispositivos sean más compactos y flexibles, lo que es ideal para la rehabilitación del tobillo, ya que esta articulación requiere un alto grado de flexibilidad y precisión en los movimientos. Un ejemplo de esto es el trabajo de Gordon & Ferris [29], quienes desarrollaron una ortesis activa que utiliza uno o dos músculos neumáticos para asistir en los movimientos de plantarflexión y dorsiflexión, ver Fig. 4.



Fig. 4. Rehabilitador de tobillo usando músculos neumáticos.

Los exoesqueletos ofrecen múltiples ventajas en el ámbito de la rehabilitación del tobillo, siendo una de las más notables su capacidad para proporcionar movimientos repetitivos controlados, algo esencial en la terapia física [36-38]. Estos dispositivos permiten a los pacientes realizar ejercicios de alta intensidad sin la fatiga física que suelen experimentar los fisioterapeutas durante las sesiones prolongadas [39]. Los exoesqueletos pueden registrar datos precisos sobre el progreso del paciente, lo que facilita el seguimiento de la evolución del tratamiento y permite ajustar los ejercicios según las necesidades individuales [40-42]. Esta retroalimentación en tiempo real es invaluable para adaptar las terapias y garantizar que el paciente esté progresando de manera efectiva.

Sin embargo, los exoesqueletos también presentan ciertas limitaciones. Uno de los principales problemas es la movilidad compleja del tobillo, ya que muchos dispositivos solo asisten en los movimientos de dorsiflexión y plantarflexión, mientras que movimientos como la inversión, eversión, abducción y aducción son más difíciles de replicar con precisión. Esto puede limitar la eficacia de los exoesqueletos en la rehabilitación completa del tobillo, especialmente en pacientes con necesidades más complejas.

Otro desafío es la portabilidad de estos dispositivos. A pesar de los avances en materiales y diseño, muchos exoesqueletos siguen siendo voluminosos y difíciles de transportar, lo que restringe su uso principalmente en clínicas especializadas. La comercialización de estos dispositivos para uso personal en el hogar aún enfrenta obstáculos significativos, debido tanto a su tamaño como a su alto costo de fabricación. Estos factores limitan la accesibilidad de los exoesqueletos, impidiendo que un mayor número de pacientes se beneficien de sus ventajas.

B. Robots Basados en Plataformas

Los robots basados en plataformas son dispositivos que han evolucionado desde las primeras plataformas de rehabilitación mecánica hasta las actuales soluciones robóticas avanzadas [43]. A diferencia de los exoesqueletos, estos robots no son portátiles ni están diseñados para ser usados en el cuerpo del paciente, sino que el pie del paciente se coloca sobre una plataforma móvil que realiza movimientos controlados en diferentes direcciones [44]. Este tipo de dispositivo permite reproducir movimientos complejos del tobillo, como la plantarflexión, dorsiflexión, inversión y eversión, que son esenciales para restaurar la funcionalidad de la articulación.

Uno de los robots más representativos dentro de la categoría de plataformas para la rehabilitación del tobillo es el Rutgers Ankle, un dispositivo pionero que abrió las puertas a la rehabilitación robótica basada en plataformas [45]. Este robot es capaz de ejecutar movimientos en seis grados de libertad (DOF), lo que permite una rehabilitación completa de la articulación del tobillo, ver Fig. 5. Una característica clave de este dispositivo es su integración con un sistema de RV, lo que permite a los pacientes interactuar con entornos virtuales mientras realizan sus ejercicios [46]. Esta combinación de rehabilitación física y estimulación cognitiva ha demostrado ser eficaz en estudios clínicos, especialmente para pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular o lesiones traumáticas en el tobillo [47, 48].



Fig. 5. Rutgers Ankle.

El Nuvabat es otro robot basado en una plataforma que ha demostrado su eficacia en la rehabilitación del tobillo [49]. Desarrollado en la Universidad Northeastern, este robot se diferencia de otros dispositivos debido a su capacidad para

proporcionar una retroalimentación de fuerza variable, lo que permite ajustar la resistencia y la velocidad de los movimientos según el estado del paciente, ver Fig. 6.

A medida que la tecnología avanzó, las plataformas basadas en actuadores neumáticos y eléctricos reemplazaron los métodos puramente mecánicos, lo que permitió un control más preciso de los movimientos de rehabilitación [50-56]. Estas plataformas son particularmente útiles en entornos clínicos donde se requiere un control detallado de los movimientos y una monitorización continua del progreso del paciente [57, 58].

Los robots basados en plataformas ofrecen varias ventajas significativas en el contexto de la rehabilitación del tobillo. En primer lugar, proporcionan un control preciso del ROM, lo que es crucial para restaurar la funcionalidad completa del tobillo [59-61]. A diferencia de los dispositivos convencionales, estas plataformas permiten un ajuste detallado de los movimientos, lo que facilita la personalización de los ejercicios según las necesidades del paciente [62, 63]. Esta capacidad para controlar el ROM con gran precisión es especialmente útil en casos de rehabilitación postquirúrgica o para pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares, donde la movilidad debe ser restaurada de manera progresiva y controlada [64, 65]. Gracias a su diseño mecánico y el uso de actuadores avanzados, las plataformas pueden replicar movimientos en múltiples direcciones, lo que es esencial para una rehabilitación completa. Esto permite no solo mejorar la movilidad del paciente, sino que también fortalece los músculos y mejora la propiocepción, lo que reduce el riesgo de futuras lesiones [66]. La posibilidad de integrar estos dispositivos con sistemas de RV añade una dimensión motivacional, haciendo que los ejercicios sean más atractivos y menos monótonos, especialmente en infantes [67].

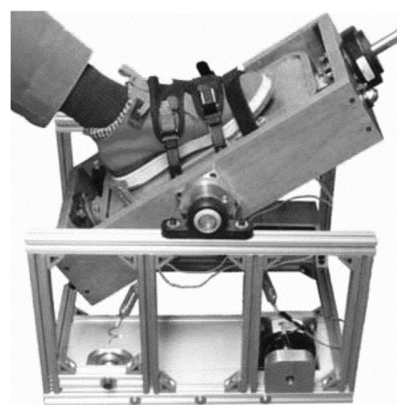


Fig. 6. Nuvabat.

A pesar de sus ventajas, los robots basados en plataformas presentan algunas limitaciones que dificultan su adopción generalizada. Una de las principales limitaciones es su baja portabilidad. Debido a su tamaño y diseño, estos dispositivos suelen ser voluminosos y están diseñados para su uso en entornos clínicos, lo que limita su aplicación en el hogar o en instalaciones de rehabilitación de menor escala. Esta falta de portabilidad significa que los pacientes deben acudir a clínicas especializadas para utilizar estos dispositivos, lo que puede representar un obstáculo logístico para muchos.

Otra limitación importante es el alto costo de fabricación y adquisición de estos robots. Los actuadores avanzados, los sistemas de control de precisión y la integración con tecnologías como la RV elevan considerablemente los costos de estos dispositivos. Como resultado, muchos de ellos no están disponibles comercialmente o solo pueden ser adquiridos por grandes centros médicos, lo que restringe el acceso a un número reducido de pacientes. El alto costo también dificulta su uso prolongado, ya que las instituciones que los adquieren deben considerar el retorno de la inversión en términos de eficacia clínica y utilización continua.

V. AVANCES RECIENTES EN LA TECNOLOGÍA ROBÓTICA PARA LA REHABILITACIÓN DEL TOBILLO

Una de las innovaciones clave para realizar movimientos suaves de rehabilitación ha sido la incorporación de sensores que permiten medir la fuerza, la velocidad y el ROM en tiempo real [68]. Estos sensores, además de proporcionar datos precisos sobre el progreso del paciente, también permiten personalizar los ejercicios en función de las necesidades individuales [54, 69]. Esta personalización es crucial para adaptar la rehabilitación a las patologías específicas y al estado de cada paciente.

Otra área de avance ha sido la incorporación de sistemas de RV en la rehabilitación robótica [16, 46, 70]. Estos sistemas permiten crear entornos interactivos que hacen que los ejercicios de rehabilitación sean más atractivos para los pacientes, mejorando su motivación y compromiso. La RV se ha utilizado para simular situaciones de la vida real, como caminar sobre diferentes tipos de superficies o subir y bajar escaleras, lo que mejora la funcionalidad y aplicación de la terapia [67].

Los robots de rehabilitación de tobillo también han avanzado en el uso de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático para adaptar los programas de rehabilitación según el progreso del paciente [68]. Los algoritmos de IA pueden analizar los datos recopilados por los sensores y predecir el mejor camino de rehabilitación, ajustando la resistencia o la asistencia proporcionada por el robot en tiempo real [71]. Esto no solo mejora la efectividad de la terapia, sino que también reduce la dependencia de un terapeuta para hacer ajustes manuales.

VI. RETOS ACTUALES EN LA REHABILITACIÓN ROBÓTICA DEL TOBILLO

A pesar de los avances tecnológicos, la implementación y adopción de robots para la rehabilitación del tobillo enfrentan varios desafíos técnicos, clínicos y económicos que deben superarse para maximizar su efectividad y accesibilidad.

A. Retos Técnicos

Uno de los principales problemas sigue siendo el movimiento combinado del tobillo [30, 32, 72]. Mientras que los robots actuales son efectivos en la dorsiflexión y plantarflexión, el control preciso de los movimientos laterales, rotacionales y esféricos siguen siendo una tarea complicada. Los movimientos laterales son esenciales para una rehabilitación completa del tobillo, ya que son fundamentales para la estabilidad y el

equilibrio del pie en actividades cotidianas [73]. Además, la adaptación de los dispositivos robóticos a la biomecánica particular de cada paciente sigue siendo un reto [74].

B. Retos Clínicos

Desde una perspectiva clínica, uno de los principales problemas es la falta de estudios clínicos a largo plazo que evalúen de manera exhaustiva la efectividad de estos robots en comparación con las terapias tradicionales [75, 76]. A pesar de que varios estudios presentan resultados prometedores, aún se necesitan evaluaciones más amplias que incluyan diversos tipos de pacientes y patologías, lo que permitiría establecer un marco clínico más amplio y sólido [77]. La ausencia de protocolos de rehabilitación estandarizados también dificulta la integración de los robots en las rutinas de fisioterapia convencionales [78]. Otro desafío clínico es la aceptación por parte de los pacientes y fisioterapeutas [79]. A pesar de los beneficios evidentes que ofrecen los robots, algunos profesionales de la salud se muestran reacios a adoptarlos debido a la falta de familiaridad o la percepción de que los dispositivos son demasiado complejos o difíciles de usar [80].

C. Retos Económicos y de Accesibilidad

El costo sigue siendo uno de los principales obstáculos para la adopción generalizada de robots para rehabilitación de tobillo [81]. Los sistemas robóticos actuales suelen ser costosos de desarrollar, fabricar y mantener, lo que restringe su uso en clínicas de rehabilitación. Por otro lado, la baja portabilidad es otro factor limitante. Muchos de los robots diseñados para la rehabilitación del tobillo son voluminosos y están diseñados para su uso en entornos clínicos, lo que limita la posibilidad de que los pacientes continúen con su rehabilitación en casa [7, 23, 34, 39, 45, 51, 54]. A pesar de los avances en la reducción de peso, la creación de dispositivos portátiles y accesibles sigue siendo un desafío importante.

VII. FUTURAS TENDENCIAS EN LA REHABILITACIÓN ROBÓTICA DEL TOBILLO

El futuro de la rehabilitación robótica del tobillo se perfila con avances tecnológicos que prometen mejorar la personalización, la eficacia y la accesibilidad de las terapias. A medida que se desarrollan nuevas herramientas y enfoques, como la robótica blanda, la IA, la tele-rehabilitación, la RA, y la impresión 3D, los dispositivos robóticos destinados a la rehabilitación del tobillo están preparados para convertirse en soluciones más integrales y accesibles para los pacientes de escasos recursos. A continuación, se abordan algunas de las tendencias clave que están marcando el rumbo del futuro de la rehabilitación de tobillo usando robots.

A. Robótica Blanda y Exoesqueletos Ligeros

Una de las tendencias más prometedoras es el desarrollo de exoesqueletos ligeros y flexibles que puedan adaptarse mejor a los movimientos naturales del tobillo [82, 83]. La robótica blanda, en particular, se basa en el uso de materiales flexibles que imitan la suavidad de los músculos y tendones humanos. Esto permite a los pacientes experimentar un mayor ROM y

comodidad al realizar ejercicios terapéuticos. Estos dispositivos serán especialmente útiles para la rehabilitación del tobillo, ya que pueden proporcionar el soporte necesario para movimientos delicados como la inversión y eversión, además de las más comunes que son dorsiflexión y plantarflexión.

B. *Tele-rehabilitación y Monitoreo Remoto*

La tele-rehabilitación está emergiendo como una solución que permitirá a los pacientes realizar sus ejercicios de tobillo desde casa, bajo la supervisión remota de un terapeuta [84]. Esto es especialmente importante para aquellos que viven en áreas rurales o tienen dificultades para desplazarse a una clínica. Mediante dispositivos robóticos conectados, los pacientes podrán realizar ejercicios bajo la supervisión virtual de un fisioterapeuta, quien podrá ajustar el tratamiento en función de los datos transmitidos por los sensores. Además, con la integración de la IA, los robots podrían ajustar automáticamente la terapia de acuerdo con el progreso del paciente, reduciendo la dependencia de visitas frecuentes a la clínica.

C. *Realidad Aumentada y Virtual*

La RA y la RV están mejorando la experiencia de rehabilitación del tobillo al crear entornos más inmersivos y motivacionales para los pacientes [85]. En lugar de realizar ejercicios repetitivos en entornos aburridos, los pacientes pueden interactuar con simulaciones divertidas en un entorno virtual [46, 86]. Los ejercicios en estos entornos permiten que el paciente practique movimientos específicos del tobillo en situaciones simuladas, lo que refuerza el aprendizaje motor y la memoria muscular.

D. *Impresión 3D para Dispositivos Personalizados*

Con la impresión 3D, los exoesqueletos y ortesis pueden ser ajustados a la medida exacta de la anatomía del tobillo de cada paciente [87-89]. Esta personalización es crucial, ya que un ajuste adecuado asegura que los dispositivos proporcionen el soporte correcto y el ROM adecuado durante la rehabilitación. La impresión 3D también reduce significativamente los costos y el tiempo de fabricación, permitiendo que los dispositivos se ajusten rápidamente a los cambios en las necesidades del paciente a medida que avanza en su tratamiento [90].

E. *Dispositivos más Accesibles*

La adopción masiva de robots para la rehabilitación del tobillo dependerá en gran medida de la capacidad de reducir costos y hacer que los dispositivos sean más accesibles. Con los avances en la fabricación, incluidos los materiales más económicos y la impresión 3D, se espera que los futuros dispositivos robóticos sean más económicos, permitiendo su uso en clínicas más pequeñas y para la rehabilitación domiciliar. Los dispositivos modulares también jugarán un papel importante, permitiendo a los fisioterapeutas seleccionar componentes específicos según las necesidades del paciente, lo que reduce los costos generales y mejora la adaptabilidad del tratamiento.

F. *IA y Personalización del Tratamiento*

La IA está transformando la rehabilitación del tobillo al permitir una personalización sin precedentes en los programas de tratamiento. Los robots equipados con sensores avanzados pueden recopilar los datos sobre el progreso del paciente. Los algoritmos de IA pueden analizar estos datos para ajustar automáticamente la resistencia y los ejercicios a las necesidades específicas de cada paciente, optimizando la rehabilitación y reduciendo el tiempo necesario para alcanzar la recuperación completa. Además, los sistemas de IA pueden predecir qué áreas del tobillo necesitan más atención, adaptando los tratamientos a medida que avanza la recuperación.

VIII. CONCLUSIÓN

En este artículo se presentó una revisión exhaustiva sobre el estado del arte en la rehabilitación robótica del tobillo, destacando los avances tecnológicos que han permitido el desarrollo de dispositivos más precisos y efectivos, como los exoesqueletos y los robots basados en plataformas. Se analizaron tanto las ventajas de estas tecnologías, como su capacidad para realizar movimientos controlados y repetitivos, como los desafíos que aún persisten, tales como la replicación de movimientos laterales complejos y la limitada portabilidad de algunos dispositivos. Se señaló la importancia de realizar más estudios clínicos a largo plazo para evaluar la efectividad de estas herramientas en comparación con los métodos tradicionales de rehabilitación.

Las principales tendencias que influirán en el desarrollo de la rehabilitación robótica del tobillo, tales como la IA, la tele-rehabilitación, la robótica blanda y la impresión 3D, fueron discutidas. Estas tecnologías no solo facilitarán una mayor personalización y precisión en los tratamientos, sino que también harán los dispositivos más económicos para su uso tanto en clínicas como en el hogar. A medida que esta tecnología avanza, se espera que el campo de la rehabilitación robótica continúe transformándose, mejorando la calidad de vida de los pacientes que sufren de enfermedades y lesiones en el tobillo.

REFERENCIAS

- [1] C. Zoch, V. Fialka-Moser, and M. Quittan, "Rehabilitation of ligamentous ankle injuries: a review of recent studies," *British Journal of Sports Medicine*, vol. 37, p. 291, 2003.
- [2] F. Alnajjar, R. Zaier, S. Khalid, and M. Gochoo, "Trends and technologies in rehabilitation of foot drop: A systematic review," *Expert Review of medical devices*, vol. 18, pp. 31-46, 2021.
- [3] L. A. Wilkerson, "Ankle injuries in athletes," *Primary Care: Clinics in Office Practice*, vol. 19, pp. 377-392, 1992.
- [4] D. T.-P. Fong, Y. Hong, L.-K. Chan, P. S.-H. Yung, and K.-M. Chan, "A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports," *Sports medicine*, vol. 37, pp. 73-94, 2007.
- [5] A. Thilmann, S. Fellows, and H. Ross, "Biomechanical changes at the ankle joint after stroke," *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, vol. 54, pp. 134-139, 1991.
- [6] E. T. Chen, K. C. McInnis, and J. Borg-Stein, "Ankle sprains: evaluation, rehabilitation, and prevention," *Current sports medicine reports*, vol. 18, pp. 217-223, 2019.
- [7] L. C. ee Chin, S. N. Basah, M. Affandi, M. N. Shah, S. Yaacob, Y. E. Juan, et al., "Home-based ankle rehabilitation system: Literature review and evaluation," *Jurnal Teknologi*, vol. 79, 2017.

- [8] E. Akdoğan and M. A. Adli, "The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherobot," *Mechatronics*, vol. 21, pp. 509-522, 2011.
- [9] C. H. Guzmán Valdivia, J. L. Carrera Escobedo, A. Blanco Ortega, M. A. Oliver Salazar, and F. A. Gómez Becerra, "Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot," *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*, vol. 5, pp. 255-264, 2014.
- [10] M. A. Feger, C. C. Herb, J. J. Fraser, N. Glaviano, and J. Hertel, "Supervised rehabilitation versus home exercise in the treatment of acute ankle sprains: a systematic review," *Clinics in sports medicine*, vol. 34, pp. 329-346, 2015.
- [11] N. Bükcr, R. Şavkın, and N. Ök, "Comparison of supervised exercise and home exercise after ankle fracture," *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, vol. 58, pp. 822-827, 2019.
- [12] M. Dong, Y. Zhou, J. Li, X. Rong, W. Fan, X. Zhou, et al., "State of the art in parallel ankle rehabilitation robot: a systematic review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, pp. 1-15, 2021.
- [13] C. H. Guzmán-Valdivia, A. Blanco-Ortega, M. A. Oliver-Salazar, F. A. Gómez-Becerra, and J. L. Carrera-Escobedo, "HipBot – The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation," *Mechatronics*, vol. 30, pp. 55-64, 2015.
- [14] C. H. Guzmán, A. Blanco, J. A. Brizuela, and F. A. Gómez, "Robust control of a hip-joint rehabilitation robot," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 35, pp. 100-109, 2017.
- [15] A. B. Ortega, H. A. Rivera, R. V. Bautista, and L. M. Mendoza, "Máquina de Rehabilitación de Tobillo: prototipo virtual y físico," in X Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2013, 2013.
- [16] F. Covaciu, A. Pisla, and A.-E. Iordan, "Development of a virtual reality simulator for an intelligent robotic system used in ankle rehabilitation," *Sensors*, vol. 21, p. 1537, 2021.
- [17] C. L. Brockett and G. J. Chapman, "Biomechanics of the ankle," *Orthopaedics and trauma*, vol. 30, pp. 232-238, 2016.
- [18] J. Duysens, M. Trippel, G. Horstmann, and V. Dietz, "Gating and reversal of reflexes in ankle muscles during human walking," *Experimental brain research*, vol. 82, pp. 351-358, 1990.
- [19] J. García-Campos, R. Pascual-Gutiérrez, E. Ortega-Díaz, D. Martos-Medina, F. Martínez-Merino, and S. Hernández-Sánchez, "Estiramientos del tendón de Aquiles para la fasciitis plantar. ¿Son efectivos?," *Rehabilitación*, vol. 45, pp. 57-60, 2011.
- [20] D. Tang and L. Xiao, "Recent Advances on Ankle Rehabilitation Device," *Recent Patents on Engineering*, vol. 14, pp. 56-68, 2020.
- [21] N. Zhetenbayev, A. Zhaulyt, G. Balbayev, and B. Shingissov, "Robot device for ankle joint rehabilitation: A review," *Vibroengineering Procedia*, vol. 41, pp. 96-102, 2022.
- [22] A. Erdogan, B. Celebi, A. C. Satici, and V. Patoglu, "Assist On-Ankle: a reconfigurable ankle exoskeleton with series-elastic actuation," *Autonomous Robots*, vol. 41, pp. 743-758, 2017.
- [23] Q. Miao, M. Zhang, C. Wang, and H. Li, "Towards Optimal Platform-Based Robot Design for Ankle Rehabilitation: The State of the Art and Future Prospects," *Journal of healthcare engineering*, vol. 2018, p. 1534247, 2018.
- [24] J. Li, W. Fan, M. Dong, and X. Rong, "Research on control strategies for ankle rehabilitation using parallel mechanism," *Cognitive Computation and Systems*, vol. 2, pp. 105-111, 2020.
- [25] C. H. Guzmán-Valdivia, O. Madrigal-López, O. Désiga-Orenday, J. Talavera-Otero, J. A. Brizuela-Mendoza, C. A. Chávez-Olivares, et al., "Design, development and control of a therapeutic robot incorporating aquatic therapy for ankle rehabilitation," *Machines*, vol. 9, p. 254, 2021.
- [26] S. N. Zill and E.-A. Seyfarth, "Exoskeletal sensors for walking," *Scientific American*, vol. 275, pp. 86-90, 1996.
- [27] X. Guan, L. Ji, and R. Wang, "Development of exoskeletons and applications on rehabilitation," in MATEC Web of Conferences, 2016, p. 02004.
- [28] T.-H. Hsu, C.-L. Tsai, J.-Y. Chi, C.-Y. Hsu, and Y.-N. Lin, "Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis," *Annals of physical and rehabilitation medicine*, vol. 66, p. 101674, 2023.
- [29] K. E. Gordon and D. P. Ferris, "Learning to walk with a robotic ankle exoskeleton," *Journal of biomechanics*, vol. 40, pp. 2636-2644, 2007.
- [30] A. Roy, H. I. Krebs, S. L. Patterson, T. N. Judkins, I. Khanna, L. W. Forrester, et al., "Measurement of human ankle stiffness using the anklebot," in 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007, pp. 356-363.
- [31] L. W. Forrester, A. Roy, R. N. Goodman, J. Rietschel, J. E. Barton, H. I. Krebs, et al., "Clinical application of a modular ankle robot for stroke rehabilitation," *NeuroRehabilitation*, vol. 33, pp. 85-97, 2013.
- [32] A. Roy, H. I. Krebs, J. E. Barton, R. F. Macko, and L. W. Forrester, "Anklebot-assisted locomotor training after stroke: A novel deficit-adjusted control approach," in 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 2175-2182.
- [33] J. F. Veneman, R. Kruidhof, E. E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. Van Asseldonk, and H. Van Der Kooij, "Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation," *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 15, pp. 379-386, 2007.
- [34] R. Ekkelenkamp, J. Veneman, and H. Van Der Kooij, "LOPES: a lower extremity powered exoskeleton," in Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, pp. 3132-3133.
- [35] B. Tondou, "Modelling of the McKibben artificial muscle: A review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, pp. 225-253, 2012.
- [36] W. Van Dijk, C. Meijneke, and H. Van Der Kooij, "Evaluation of the achilles ankle exoskeleton," *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 25, pp. 151-160, 2016.
- [37] S. Pardoel and M. Doumit, "Development and testing of a passive ankle exoskeleton," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 39, pp. 902-913, 2019.
- [38] P.-C. Kao, C. L. Lewis, and D. P. Ferris, "Invariant ankle moment patterns when walking with and without a robotic ankle exoskeleton," *Journal of biomechanics*, vol. 43, pp. 203-209, 2010.
- [39] Y. Bougrinat, S. Achiche, and M. Raison, "Design and development of a lightweight ankle exoskeleton for human walking augmentation," *Mechatronics*, vol. 64, p. 102297, 2019.
- [40] S. Galle, P. Malcolm, W. Derave, and D. De Clercq, "Adaptation to walking with an exoskeleton that assists ankle extension," *Gait & posture*, vol. 38, pp. 495-499, 2013.
- [41] S. Galle, P. Malcolm, S. H. Collins, and D. De Clercq, "Reducing the metabolic cost of walking with an ankle exoskeleton: interaction between actuation timing and power," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 14, pp. 1-16, 2017.
- [42] S. S. P. A. Bishe, T. Nguyen, Y. Fang, and Z. F. Lerner, "Adaptive ankle exoskeleton control: Validation across diverse walking conditions," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, pp. 801-812, 2021.
- [43] X. Zeng, G. Zhu, M. Zhang, and S. Q. Xie, "Reviewing Clinical Effectiveness of Active Training Strategies of Platform-Based Ankle Rehabilitation Robots," *Journal of healthcare engineering*, vol. 2018, p. 2858294, 2018.
- [44] C. G. Valdivia, A. B. Ortega, and M. O. Salazar, "Entendiendo la Mecatrónica en la Rehabilitación," in X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, 2013, pp. 1-6.
- [45] M. J. Gironé, G. C. Burdea, and M. Bouzid, "The "Rutgers Ankle" orthopedic rehabilitation interface," in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1999, pp. 305-312.
- [46] R. F. Boian, C. Lee, J. Deutsch, G. Burdea, and J. Lewis, "Virtual reality-based system for ankle rehabilitation post stroke," in Proc. 1st Int. Workshop Virtual Reality Rehabilitation, 2002, pp. 77-86.
- [47] J. E. Deutsch, J. Latonio, G. C. Burdea, and R. Boian, "Post-stroke rehabilitation with the Rutgers Ankle System: a case study," *Presence*, vol. 10, pp. 416-430, 2001.
- [48] D. Cioi, A. Kale, G. Burdea, J. Engsborg, W. Janes, and S. Ross, "Ankle control and strength training for children with cerebral palsy using the Rutgers Ankle CP," in 2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics, 2011, pp. 1-6.
- [49] Y. Ding, M. Sivak, B. Weinberg, C. Mavroidis, and M. K. Holden, "Nuvabat: northeastern university virtual ankle and balance trainer," in 2010 IEEE Haptics Symposium, 2010, pp. 509-514.
- [50] Y. M. Khalid, D. Gouwanda, and S. Parasuraman, "A review on the mechanical design elements of ankle rehabilitation robot," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 229, pp. 452-463, 2015.
- [51] J. Yoon, J. Ryu, and K. B. Lim, "Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises," *Journal of Field Robotics*, vol. 22, 2006.
- [52] I. Doroftei, C.-M. Cazacu, and S. Alaci, "Design and experimental testing of an ankle rehabilitation robot," in Actuators, 2023, p. 238.
- [53] Y. Liu, W. Lu, H. Wu, Y. Xia, B. Hu, and D. Zeng, "Performance analysis and trajectory planning of multi-locomotion mode ankle rehabilitation robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 157, p. 104246, 2022.

- [54] C. Wang, L. Wang, J. Qin, Z. Wu, L. Duan, Z. Li, et al., "Development of an ankle rehabilitation robot for ankle training," in 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, 2015, pp. 94-99.
- [55] P. Jamwal, S. Xie, Y. Tsoi, and K. Aw, "Forward kinematics modelling of a parallel ankle rehabilitation robot using modified fuzzy inference," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, pp. 1537-1554, 2010.
- [56] P. K. Jamwal, S. Hussain, M. H. Ghayesh, and S. V. Rogozina, "Impedance control of an intrinsically compliant parallel ankle rehabilitation robot," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 3638-3647, 2016.
- [57] Y. Zou, A. Zhang, Q. Zhang, B. Zhang, X. Wu, and T. Qin, "Design and experimental research of 3-RRS parallel ankle rehabilitation robot," *Micromachines*, vol. 13, p. 950, 2022.
- [58] Q. Ai, C. Zhu, J. Zuo, W. Meng, Q. Liu, S. Q. Xie, et al., "Disturbance-estimated adaptive backstepping sliding mode control of a pneumatic muscles-driven ankle rehabilitation robot," *Sensors*, vol. 18, p. 66, 2017.
- [59] S. Qu, R. Li, W. Yao, C. Ma, and Z. Guo, "Structure design, kinematics analysis, and effect evaluation of a novel ankle rehabilitation robot," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 6109, 2023.
- [60] J. Li, Y. Zhou, M. Dong, X. Rong, and R. Jiao, "Clinically oriented ankle rehabilitation robot with a novel mechanism," *Robotica*, vol. 41, pp. 277-291, 2023.
- [61] Q. Meng, G. Liu, X. Xu, Q. Meng, and H. Yu, "Design and analysis of a supine ankle rehabilitation robot for early stroke recovery," *Machines*, vol. 11, p. 787, 2023.
- [62] D. Zeng, Y. Liu, C. Qu, J. Cong, Y. Hou, and W. Lu, "Design and human-robot coupling performance analysis of flexible ankle rehabilitation robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023.
- [63] M. Ni, J. Liu, Z. Sun, and T. Sun, "Design and experiment of an ankle rehabilitation robot after fracture surgery," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 16, 2024.
- [64] Z. Sun, A. Mu, C. Wang, Q. Liu, F. Hao, J. Wei, et al., "Research on an ankle rehabilitation robot for hemiplegic patients after stroke," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 237, pp. 1177-1189, 2023.
- [65] Q. Zhang, Y. Wang, M. Zhou, D. Li, J. Yan, Q. Liu, et al., "Ankle rehabilitation robot training for stroke patients with foot drop: Optimizing intensity and frequency," *NeuroRehabilitation*, vol. 53, pp. 567-576, 2023.
- [66] N. Zhetenbayev, G. Balbayev, D. Aknur, A. Zhauyt, and B. Shingissov, "Developing of a wearable ankle rehabilitation robotic device," *Vibroengineering Procedia*, vol. 48, pp. 36-41, 2023.
- [67] S. Shinde, M. B. Salunke, M. K. Devidas, S. Bansal, P. Salunkhe, and S. Habbu, "Robotic-assisted ankle rehabilitation utilizing electrical stimulation and virtual reality training paradigms," *Journal of Electrical Systems*, vol. 20, pp. 1048-1060, 2024.
- [68] L.-F. Yeung, C. Ockenfeld, M.-K. Pang, H.-W. Wai, O.-Y. Soo, S.-W. Li, et al., "Design of an exoskeleton ankle robot for robot-assisted gait training of stroke patients," in 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2017, pp. 211-215.
- [69] U. Martinez-Hernandez, A. Rubio-Solis, V. Cedeno-Campos, and A. A. Dehghani-Sanij, "Towards an intelligent wearable ankle robot for assistance to foot drop," in 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2019, pp. 3410-3415.
- [70] A. Otaran and I. Farkhatdinov, "Haptic ankle platform for interactive walking in virtual reality," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, pp. 3974-3985, 2021.
- [71] K. Nakagawa, K. Higashi, A. Ikeda, N. Kadono, E. Tanaka, and L. Yuge, "Robotic ankle control can provide appropriate assistance throughout the gait cycle in healthy adults," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 16, p. 993939, 2022.
- [72] A. Roy, H. I. Krebs, C. T. Bever, L. W. Forrester, R. F. Macko, and N. Hogan, "Measurement of passive ankle stiffness in subjects with chronic hemiparesis using a novel ankle robot," *Journal of neurophysiology*, vol. 105, pp. 2132-2149, 2011.
- [73] M. S. Ayas and I. H. Altas, "Fuzzy logic based adaptive admittance control of a redundantly actuated ankle rehabilitation robot," *Control Engineering Practice*, vol. 59, pp. 44-54, 2017.
- [74] W. Meng, C. Zhu, J. Zuo, Q. Ai, Q. Liu, and S. Q. Xie, "Design and modelling of a compliant ankle rehabilitation robot redundantly driven by pneumatic muscles," in 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2019, pp. 459-464.
- [75] M. Zhang, T. C. Davies, and S. Xie, "Effectiveness of robot-assisted therapy on ankle rehabilitation—a systematic review," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 10, pp. 1-16, 2013.
- [76] X. Zhai, Q. Wu, X. Li, Q. Xu, Y. Zhang, S. Fan, et al., "Effects of robot-aided rehabilitation on the ankle joint properties and balance function in stroke survivors: a randomized controlled trial," *Frontiers in Neurology*, vol. 12, p. 719305, 2021.
- [77] Y. Lee, K. Chen, Y. Ren, J. Son, B. A. Cohen, J. A. Sliwa, et al., "Robot-guided ankle sensorimotor rehabilitation of patients with multiple sclerosis," *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, vol. 11, pp. 65-70, 2017.
- [78] R. S. Calabrò, L. Billeri, F. Ciappina, T. Balletta, B. Porcari, A. Cannavò, et al., "Toward improving functional recovery in spinal cord injury using robotics: a pilot study focusing on ankle rehabilitation," *Expert review of medical devices*, vol. 19, pp. 83-95, 2022.
- [79] D. Bradley, C. Acosta-Marquez, M. Hawley, S. Brownsell, P. Enderby, and S. Mawson, "NeXOS – The design, development and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs," *Mechatronics*, vol. 19, pp. 247-257, 2009/03/01/ 2009.
- [80] K. P. Michmizos, S. Rossi, E. Castelli, P. Cappa, and H. I. Krebs, "Robot-aided neurorehabilitation: a pediatric robot for ankle rehabilitation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 23, pp. 1056-1067, 2015.
- [81] M. Vallés, J. Casalilla, Á. Valera, V. Mata, Á. Page, and M. Díaz-Rodríguez, "A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation," *Robotica*, vol. 35, pp. 1939-1957, 2017.
- [82] W. Meng, Q. Liu, M. Zhang, Q. Ai, and S. Q. Xie, "Compliance adaptation of an intrinsically soft ankle rehabilitation robot driven by pneumatic muscles," in 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2017, pp. 82-87.
- [83] F.-Z. Low, J. H. Lim, and C.-H. Yeow, "Design, characterisation and evaluation of a soft robotic sock device on healthy subjects for assisted ankle rehabilitation," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 42, pp. 26-34, 2018.
- [84] T. G. Russell, R. Blumke, B. Richardson, and P. Truter, "Telerehabilitation mediated physiotherapy assessment of ankle disorders," *Physiotherapy Research International*, vol. 15, pp. 167-175, 2010.
- [85] K.-J. Kim and M. Heo, "Effects of virtual reality programs on balance in functional ankle instability," *Journal of physical therapy science*, vol. 27, pp. 3097-3101, 2015.
- [86] M. Zhang, G. Zhu, A. Nandakumar, S. Gong, and S. Xie, "A virtual-reality tracking game for use in robot-assisted ankle rehabilitation," in 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2014, pp. 1-4.
- [87] Y. H. Cha, K. H. Lee, H. J. Ryu, I. W. Joo, A. Seo, D.-H. Kim, et al., "Ankle-foot orthosis made by 3D printing technique and automated design software," *Applied bionics and biomechanics*, vol. 2017, p. 9610468, 2017.
- [88] R. K. Salih and W. S. Aboud, "Smart Robotic Exoskeleton: Constructing Using 3D Printer Technique for Ankle-Foot Rehabilitation," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 4, pp. 537-547, 2023.
- [89] C. Belvedere, S. Siegler, A. Fortunato, P. Caravaggi, E. Liverani, S. Durante, et al., "New comprehensive procedure for custom-made total ankle replacements: medical imaging, joint modeling, prosthesis design, and 3D printing," *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 37, pp. 760-768, 2019.
- [90] M. Walbran, K. Turner, and A. McDaid, "Customized 3D printed ankle-foot orthosis with adaptable carbon fibre composite spring joint," *Cogent engineering*, vol. 3, p. 1227022, 2016.