

Exoskeleton Robots for Rehabilitation: State of the Art and Future Trends

M. Cardona, *Senior Member, IEEE*
Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC
Universidad Politécnica de Madrid, y
Facultad de Ingeniería
Universidad Don Bosco
manuel.cardona@udb.edu.sv

M.A. Destarac and C.E. García
Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC
Universidad Politécnica de Madrid, y
Aura Innovative Robotics
marie@aurarobotix.com
cecilia.garcia@upm.es

Abstract—In this paper a comprehensive review of exoskeletons for upper and lower limb rehabilitation is presented. Commercial robots with an emphasis on the pathologies they deal with are described and classified using the NASA Technology Readiness Level (TRL) metric. In addition, their movements and certifications are reviewed. Finally, future trends regarding the use of exoskeletons in the rehabilitation process are discussed.

Index Terms—Exoskeleton, Ictus, Lower Limb, Rehabilitation, Robotics, Spinal Cord Injury, Stroke, Upper Limb.

I. INTRODUCCIÓN

UN exoesqueleto es un dispositivo electromecánico que puede llevar puesto una persona para ayudar a aumentar las capacidades físicas, asistir en casos de discapacidades o ayudar en casos terapéuticos de rehabilitación.

Generalmente, un exoesqueleto incluye una estructura mecánica compuesta por eslabones y juntas activas y pasivas, un sistema de potencia, que por lo general son actuadores eléctricos, y sensores que ayudan a determinar los pares aplicados por los motores. Además, algunos incluyen sensores para capturar señales biológicas, tales como los de electromiografía (EMG) para captar las señales musculares o los de electroencefalografía (EEG) que permiten captar señales eléctricas cerebrales y convertirlas en señales de mando.

En el caso de los exoesqueletos para rehabilitación, se busca que estos dispositivos ayuden al paciente en la rehabilitación después de haber sufrido algún tipo de lesión muscular o nerviosa, o para ejercitar a la población mayor. La rehabilitación se logra a través de rutinas de entrenamiento previamente establecidas por un profesional.

Según datos del "National Spinal Cord Injury Statistical Center (NSCISC)", la incidencia de lesión de médula espinal es aproximadamente 54 casos por cada millón de personas en Estados Unidos, siendo la población actual de 324 millones de habitantes se tienen aproximadamente 17,500 nuevos casos cada año. Mientras que la tasa prevalencia de personas en el 2017 es de 285,000 aproximadamente [1].

El uso de estos dispositivos para terapias de rehabilitación se vuelven una herramienta muy valiosa para los terapeutas, ya que les asiste en las sesiones que imparten. Además, se ha demostrado a través de diferentes estudios [2], [3], [4], [6],

[7], que el uso de exoesqueletos en procesos de rehabilitación genera resultados positivos.

Este trabajo presenta el estado del arte de los exoesqueletos para rehabilitación con un enfoque diferente a lo reportado por la literatura [8], [9], [10], ya que cubre exoesqueletos de miembro superior e inferior con sus respectivas características tales como: la movilidad, las patologías para las cuales aplican, normativas. etc.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: primero se comenta sobre el papel de la robótica en la rehabilitación, luego se presentan los exoesqueletos de miembro superior e inferior más avanzados en cuanto a su desarrollo tecnológico, incluyendo sus respectivas características, y finalmente se discuten las tendencias futuras.

II. LA ROBÓTICA EN LA REHABILITACIÓN

En los últimos 15 años las investigaciones en el campo de la robótica de rehabilitación han crecido exponencialmente como lo demuestran [11], [12], [13]. Esto se debe a varios factores, entre los que podemos nombrar la importante ayuda que estos dispositivos le aportan a los fisioterapeutas al ejecutar los movimientos repetitivos que el paciente debe realizar, reduciendo así la sobrecarga física del profesional [14].

Además, diferentes causas como el sedentarismo, el envejecimiento de la población y las bajas tasas de natalidad, sobretudo en países desarrollados, hacen prever un futuro preocupante para la capacidad asistencial de los sistemas sanitarios en materia de rehabilitación. El uso clínico de estos dispositivos puede ayudar a reducir las listas de espera en los servicios de rehabilitación al poder atender a varios pacientes a la vez, según el número de exoesqueletos disponibles.

Actualmente la rehabilitación se realiza uno a uno por lo que los recursos humanos y materiales no son suficientes para cubrir la demanda actual. El aumento de lesiones músculo-esqueléticas ha sido motivo de preocupación para varios organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que en 2013 hizo un llamado para alertar a los gobiernos acerca de esta grave problemática [15].

Otro factor relevante a favor de los exoesqueletos son los datos que pueden aportar al fisioterapeuta relacionados a la evolución del paciente [16], lo que le ayuda al profesional

a tomar decisiones más acertadas sobre la adaptación de la terapia a cada paciente, ya que no hay dos lesiones iguales.

III. EXOSQUELETOS DE MIEMBRO SUPERIOR

Las extremidades superiores se han especializado para realizar las funciones de prensión y manipulación de los objetos, y la evolución ha dado como resultado que el hombro sea la articulación más móvil de todas las que posee el cuerpo humano, gracias a las diferentes articulaciones que lo conforman y a los grupos musculares y tendones que se entrelazan con la arquitectura ósea. Por ello, tienen una relevancia importante en las actividades de la vida diaria, como comer o asearse [17].

Según datos publicados por la OMS, actualmente, 1,700 millones de personas en todo el mundo padecen una lesión musculoesquelética [15]. El 20 % tienen relación directa con el hombro y sus causas son diversas como caídas, accidentes laborales, automovilísticos, ictus, entre otras.

Muchos de los exoesqueletos de rehabilitación han surgido con el objetivo de ayudar en la neuro-rehabilitación de pacientes que han sufrido un infarto cerebral, siendo ésta la principal causa de discapacidad en adultos [18]. Sin embargo, existen otras condiciones que también afectan la movilidad del miembro superior y que pueden tratarse con un exoesqueleto de rehabilitación, como las lesiones músculo-esqueléticas [19] o la esclerosis múltiple [20].

Durante la búsqueda del estado del arte, pueden encontrarse varios ejemplos de exoesqueletos para miembro superior [18], [21], [22], [23], debido principalmente a la evidencia de que este tipo de dispositivos robóticos contribuyen efectivamente en la rehabilitación de lesiones o trastornos mencionados anteriormente [24], [25], [26].

Un aspecto interesante a comentar es que el mayor desarrollo de exoesqueletos de rehabilitación de miembro superior se ha realizado en el ámbito académico o de investigación, a nivel de prototipo, y los ejemplos de dispositivos comerciales son escasos. En la tabla I se presentan los dispositivos robóticos de rehabilitación de brazo más relevantes respecto al nivel de desarrollo que tienen, así como sus características principales. Para simplificar su clasificación, se agrupan según su Technology Readiness Level (TRL) correspondiente, que es una medida propuesta por la NASA para describir la madurez de una tecnología [27].

Los dispositivos que ya están actualmente en el mercado y tienen un nivel de TRL 9 son el ArmeoPower, el InMotion ARM, el KINARM Lab y el ReoGo, tal como se muestra en la Tabla I, en la que puede encontrarse la aprobación que tiene cada uno de ellos. Los exoesqueletos ALEx y ORTE tienen pendiente aún la aprobación correspondiente para poder ser comercializados, sin embargo, su grado de desarrollo o TRL (7/8) ya permite diferenciarlos de los prototipos que aún están en fase de investigación.

El «Armeo Therapy Concept» de Hocoma consiste de tres dispositivos que se usan en distintas fases del proceso de rehabilitación del paciente. El ArmeoPower es el único que cuenta con actuadores y por ello puede ser usado para tratar

distintas patologías en las que la funcionalidad del brazo se ve limitada, como el ictus, trastornos ortopédicos o neurológicos, lesiones, etc [28].

ArmeoPower se muestra en la Fig.1b, tiene 6 grados de libertad (GDL) activos que cubren el 85 % del espacio de trabajo en 3 dimensiones (3D) de un brazo sano, permitiendo los siguientes movimientos: la abducción/aducción, la flexión/extension y la rotación interna/externa del hombro, así como la flexión/extension del codo y la muñeca, y la pronación/supinación del antebrazo. Se han realizado estudios del uso de este dispositivo en pacientes con ictus [29] y esclerosis múltiple [30], reportando en ellos resultados positivos. Otros estudios que se están llevando a cabo actualmente se presentan en [31].



Figura 1: Exoesqueletos de miembro superior: a) Wereable Robotics, b) Hocoma, c) Bionik, d) BKIN Technologies, e) AURA, f) Motorika Medical.

Uno de los primeros exoesqueletos creados para la rehabilitación de miembro superior es el InMotion ARM, desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) bajo el nombre de MIT-Manus, y actualmente comercializado por Bionik [21]. El tipo de rehabilitación que puede realizarse con este dispositivo, que se muestra en la Fig.1c, es en 2D y los movimientos activos que cubre son la rotación interna/externa del hombro y la flexión/extension del codo. Cuenta con un movimiento pasivo a rehabilitar, que es la protracción-retracción del hombro.

Las patologías que pueden tratarse con el InMotion ARM son el Parkinson, ictus, parálisis cerebral, esclerosis múltiple, entre otras. Con este dispositivo se realizó uno de los primeros estudios sobre la rehabilitación de pacientes con ictus haciendo uso de un robot [32], y otros más han sido presentados a lo largo de estos últimos años [33].

El dispositivo ReoGo fue desarrollado para tratar distintas

condiciones neurológicas, así como disfunciones en el miembro superior e inferior debidas a problemas ortopédicos o post-cirugía. Tiene 2 GDL activos y uno pasivo que permiten la rehabilitación en 3D y los movimientos de abducción/aducción horizontal del hombro, flexión/extension del codo y la del hombro. Se han realizado algunos estudios de aceptación en pacientes que han sufrido un ictus, así como análisis de funcionalidad del dispositivo [34], [35], [2].

El Kinarm Lab es un dispositivo de rehabilitación en 2D que puede ser usado por niños y adultos. La empresa desarrolladora ofrece la opción de alquilarlo o comprarlo para fines de investigación. Entre sus principales características está la obtención de datos precisos sobre el impacto que tiene una lesión o enfermedad cerebral en las funciones motoras, sensoriales y cognitivas del paciente [36], [37].

El dispositivo Arm Lightweight Exoskeleton (ALEX), que se muestra en la Fig. 1a, permite la rehabilitación en 3D de pacientes con trastornos neurológicos, lesiones músculo-esqueléticas o ictus. Tiene 6 GDL activos que permiten la abducción/aducción, la flexión/extension y la rotación interna/externa del hombro, así como la flexión/extension del codo y la muñeca, y la pronación/supinación del antebrazo [38], [3]. Puede ser adquirido para rehabilitar un brazo o ambos.

ORTE es un exoesqueleto de rehabilitación de hombro y codo [39] de 6 GDL que permite la abducción/aducción, la flexión/extension y la rotación interna/externa del hombro, así como la flexión/extension del codo, la pronación/supinación del antebrazo y la elevación/depresión de la escápula. Además, ORTE cuenta con un simulador músculo-esquelético del miembro superior que ayuda a valorar el estado muscular del paciente y establecer terapias personalizadas [40].

Respecto al software, todos los dispositivos que se han mencionado anteriormente cuentan con una interfaz de configuración del exoesqueleto, así como una serie de videojuegos para potenciar la concentración del paciente.

IV. EXOESQUELETOS DE MIEMBRO INFERIOR

De la misma manera que en el caso de exoesqueletos de miembro superior, es en el ámbito académico donde se han desarrollado la mayoría para miembro inferior. Existe un número limitado de exoesqueletos de miembro inferior disponibles en el mercado; entre ellos están: Lokomat, ReWalk, HAL, Ekso GT, Rex e Indego (Fig. 2).

Lokomat fue el primer exoesqueleto disponible en el mercado, incluye una cinta caminadora y posee 2 GDL activos por cada extremidad (Flexión/extension de la cadera y rodilla), posee marcado CE y tiene en trámite la aprobación de la FDA (Food and Drug Administration). Se han realizado estudios de la efectividad del uso de Lokomat como dispositivo de rehabilitación en pacientes con ictus [4], [41], lesiones de la médula espinal [42], [43], y parálisis cerebral [44], [45].

ReWalk fue el primer exoesqueleto de rehabilitación aprobado por la FDA para uso personal. Posee 2 GDL activos por cada pierna (Flexión/extension de la cadera y rodilla). El usuario puede controlar los movimientos cambiando su centro de gravedad, lo cual se logra inclinándose. Por ejemplo,



Figura 2: Exoesqueletos de las empresas: a) Hocoma, b) ReWalk Robotics, c) Cyberdyne, d) Ekso Bionics, e) Rex Bionics, f)Indego (Parker Hannifin).

si el usuario se inclina hacia adelante el sistema captura la inclinación e inicia el primer paso facilitando la marcha del paciente. Además, es el exoesqueleto que posee mayor autonomía de batería con 8 horas de uso continuo. Rewalk se ha probado en pacientes con lesiones de la médula espinal [5], [46], [47] y con paraplejia [48], [49], brindando resultados positivos.

El exoesqueleto HAL (Hybrid Assistive Limb), es el único exoesqueleto comercial a la fecha en utilizar señales de control provenientes de sensores EMG permitiendo detectar las intenciones de movimiento del paciente, posee marcado CE y tiene en proceso la aprobación de la FDA. HAL posee 2 GDL por cada pierna (Flexión/extension de la cadera y rodilla) y ayuda en la rehabilitación de personas con lesiones cerebrales, medulares o neuromusculares. Se han realizado estudios del uso de HAL en pacientes con lesiones de la médula espinal [6], [7], e ictus [50], [51], [52], reportando buenos resultados.

Ekso GT, es un exoesqueleto para la rehabilitación de personas con desórdenes de la marcha. Se han reportado resultados positivos a partir de ensayos con pacientes con ictus [53], [54] y lesiones de la médula espinal [55], [56]. Posee marcado CE y la aprobación de la FDA. El dispositivo posee 2 GDL activos (Flexión/extension de la cadera y rodilla) y 1 pasivo (Flexión Plantar/Dorsal del tobillo) por cada pierna, y detecta la intención de marcha cuando el paciente se balancea sobre su pelvis.

Rex es un mecanismo de 5 GDL activos por cada pierna (Flexión/extension y abducción/aducción de la cadera, Fle-

TABLA I: Características de los Exoesqueletos de Miembro Superior

Producto	Empresa	GDL	Movimientos	Patologías	Aprobación	TRL
ALEX	Wereable Robotics	4 activos, 2 pasivos	Abducción/aducción, Rotación interna/externa y Flexión/extension del hombro Flexión/extension del codo Pronación/supinación del antebrazo Flexión/extension de la muñeca	Ictus, trastornos neurológicos u ortopédicos y lesiones músculo-esqueléticas	Pendiente	8/9
ArmeoPower	Hocoma	6 activos	Abducción/aducción, Rotación interna/externa y Flexión/extension del hombro Flexión/extension del codo Pronación/supinación del antebrazo Flexión/extension de la muñeca	Ictus, esclerosis múltiple, parálisis cerebral, Parkinson, neuropatías, trastornos neurológicos u ortopédicos, lesiones músculo-esqueléticas o cerebrales	CE, FDA, Canadá	9
InMotion ARM	Bionik	2 activos, 1 pasivo	Protracción/retracción, Rotación interna/externa y Flexión/extension del codo	Ictus, Parkinson, esclerosis múltiple, parálisis cerebral y lesión de la médula espinal	CE, FDA	9
KINARM Lab	BKIN Technologies	2 pasivos	Flexión/extension del codo y del hombro en horizontal (para ambos)	Ictus, autismo, parálisis y lesiones cerebrales	Pendiente	9
ORTE	Aura Innovative Robotics	6 activos	Abducción/aducción Elevación/depresión Rotación interna/externa Flexión/extension del hombro Flexión/extension del codo Pronación/supinación del antebrazo	Ictus, esclerosis múltiple, trastornos neurológicos u ortopédicos y lesiones músculo-esqueléticas	Pendiente	7
ReoGo	Motorika Medical	2 activos, 1 pasivo	Abducción/aducción horizontal del hombro, Flexión/extension del codo, Flexión/extension del hombro	Ictus, lesión de la médula espinal, trastornos neurológicos y lesiones músculo-esqueléticas	CE, FDA, Asia	9

xión/extension de la rodilla, Flexión Plantar/Dorsal del tobillo e inversión/eversión del pie) haciendo un total de 10 actuadores lineales. Rex posee marcado CE y es el único a la fecha que no necesita dispositivos de equilibrio adicional, como muletas o andador, ya que incorpora un sistema de auto balanceo. Rex tiene la desventaja de ser muy pesado lo cual lo hace bastante lento. En el caso de Rex no se han reportado a la fecha resultados contundentes de estudios que validen el uso de este dispositivo como ayuda a la rehabilitación.

Indego fue diseñado para rehabilitar lesiones de médula espinal y desordenes de la marcha. Posee marcado CE y fue el segundo exoesqueleto en recibir la aprobación de la FDA para uso personal. Posee 2 GDL por pierna (Flexión/extension de la cadera y rodilla), es el más modular y liviano del mercado (12 kg) convirtiéndolo en el exoesqueleto de miembro inferior más portable. La compañía reporta resultados positivos para la rehabilitación de pacientes con ictus [57] y paraplejia [58], [59], [60].

Un resumen con las características de cada exoesqueleto se muestra en la tabla II.

V. TENDENCIAS FUTURAS

Los avances conseguidos hasta el momento en el tema de la robótica de rehabilitación responden a un aumento considerable en los últimos años del número de personas que requieren rehabilitación en alguno de sus miembros. Según datos de 2014 [61], en España hay 91 fisioterapeutas por cada

100,000 habitantes, por lo que la cantidad de profesionales es insuficiente para cubrir la demanda y las listas de espera tienden a aumentar año con año.

Lo anterior provoca que las sesiones sean más espaciadas, y en consecuencia, que los avances notados por el paciente no sean tan rápidos, aumentando el costo del tratamiento al extenderse el tiempo que requiere. Un paciente concentrado y motivado, que recibe rehabilitación de manera constante, tiene altas probabilidades de recuperarse y mejorar así su calidad de vida.

Por otro lado, la sobrecarga física que representa para los fisioterapeutas la labor que realizan día a día, provoca lesiones en muchos casos y se convierten a sí mismo en pacientes.

Los exoesqueletos robóticos se han convertido en una herramienta conveniente para solucionar los problemas mencionados anteriormente. El objetivo es que éstos cubran la etapa intermedia de la rehabilitación, en la que se realizan los movimientos repetitivos, dejando a cargo del especialista la etapa inicial y final. Además, su uso también es conveniente como instrumento de medición de la evolución del paciente, al aportar datos al fisioterapeuta para tomar las decisiones correctas acerca de los ejercicios más apropiados.

A pesar que el desarrollo de exoesqueletos de rehabilitación ha ganado auge en los últimos años, se encuentran pocos ejemplos comerciales. Esto se debe al largo y costoso proceso que requiere el cumplimiento de la normativa que permite la venta y uso clínico de los dispositivos. Por un lado, las

TABLA II: Características de los Exoesqueletos de Miembro Inferior

Producto	Empresa	GDL por pierna	Movimientos	Patologías	Aprobación	TRL
Lokomat	Hocoma	2 activos	Flexión/extensión de Cadera Flexión/extensión de Rodilla	Ictus, Lesiones cerebrales traumáticas, Paraplejía, Parálisis Cerebral, Esclerosis Múltiple, Parkinson, Endoprótesis, Enfermedades Degenerativas, Atrofia Muscular en la Columna	CE, FDA	9
ReWalk	ReWalk Robotics	2 activos	Flexión/extensión de Cadera Flexión/extensión de Rodilla	Ictus, parálisis, lesiones cerebrales, lesión de médula espinal	CE, FDA	9
HAL	Cyberdyne	2 activos	Flexión/extensión de Cadera Flexión/extensión de Rodilla	Ictus, parálisis cerebral, desordenes nerviosos o musculares, lesión de médula espinal	CE	9
Ekso GT	Ekso Bionics	2 activos, 1 pasivo	Flexión/extensión de Cadera Flexión/extensión de Rodilla	Ictus, lesión de médula espinal, parálisis, desordenes de la marcha	CE, FDA	9
Rex	Rex Bionic	5 activos	Flexión/extensión de Cadera Abducción/Aducción de Cadera Flexión/extensión de Rodilla Flexión Dorsal/plantar de tobillo Inversión/eversión del tobillo	Ictus, Lesiones de médula espinal, Distrofia Muscular, Esclerosis Múltiple, Síndrome Postpolio	CE	9
Indego	Indego	2 activos	Flexión/extensión de Cadera Flexión/extensión de Rodilla	Lesiones de médula espinal, rehabilitación de la marcha	CE, FDA	9

empresas deben someter el equipo a ensayos de seguridad que son destructivos, y por otro, a ensayos clínicos que avalen su eficacia en el tratamiento de los pacientes.

Por las razones anteriores, el crecimiento del mercado de los exoesqueletos ha ido aumentando año con año. En 2016 fue de \$203 millones y se espera que alcance los \$1,100 millones en 2021 [62]. Esto implicará un aumento sustancial en las investigaciones en el campo, que permitirá mejorar los dispositivos existentes incorporando las experiencias generadas del uso de ellos en terapias de rehabilitación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad de España y a la Comunidad de Madrid por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación gracias a la ayuda DI-14-06967 y S2013/MIT-2748, respectivamente. Ésta última forma parte del proyecto ROBOCITY 2030-III. También se agradece a la Fundación Carolina, España, por el apoyo para la realización de esta investigación gracias a la beca de Doctorado otorgada en el marco del convenio con la Universidad Don Bosco, El Salvador.

REFERENCIAS

- [1] National Spinal Cord Injury Statistical Center, Facts and Figures at a Glance. Birmingham, AL: University of Alabama at Birmingham, 2017.
- [2] K. Takahashi, K. Domen, T. Sakamoto, et. al., "Efficacy of Upper Extremity Robotic Therapy in Subacute Poststroke Hemiplegia: An Exploratory Randomized Trial," *Stroke*, vol.47, no.(5), pp.1385-8, May 2016.
- [3] E. Pirondini, M. Coscia, S. Marcheschi, et al., "Evaluation of the effects of the Arm Light Exoskeleton on movement execution and muscle activities: a pilot study on healthy subjects," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 13, no. 9, January 2016.
- [4] Hidler J., Nichols D, Pelliccio M, et al. "Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke", *Neurorehabilitation and Neural Repair*, Vol 23, Issue 1, pp. 5 - 13, September 2008.
- [5] Raab K, Krakow K, Tripp F, Jung M. "Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study". *Spinal Cord Ser Cases*, January 2016.
- [6] Grasmücke D, Zierjacks A, Jansen O, et al. "Against the odds: what to expect in rehabilitation of chronic spinal cord injury with a neurologically controlled Hybrid Assistive Limb exoskeleton. A subgroup analysis of 55 patients according to age and lesion level". *NeuroRehabilitation Journal*, May 2017.
- [7] Szczesny-Kaiser M, Höffken O, Aach M, et al. "HAL exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients". *J Neuroeng Rehabil.* August 2015.
- [8] N. Koceska and S. Koceski, "Review: Robot Devices for Gait Rehabilitation," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 62, no. 13, pp. 1-8, 2013.
- [9] A. J. Young and D. P. Ferris, "State-of-the-art and Future Directions for Robotic Lower Limb Robotic Exoskeletons," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 171-182, 2017.
- [10] V. Lajeunesse, C. Vincent, F. Routhier, E. Careau, and F. Michaud, "Exoskeletons design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 11, no. 7, pp. 535-547, 2016.
- [11] F. Yakub, A.Z. Khudzari and Y. Mori, "Recent trends for practical rehabilitation robotics, current challenges and the future," *Int. J. Rehabil. Res.*, vol.37, no.1, pp.9-21, March 2014.
- [12] L. Chong, S. Jianfeng and J. Linhong, "Lower Limb Rehabilitation Robots: A Review," *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, pp.2042-2045, May 2012.
- [13] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, et.al., "A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol.11, no.3, January 2014.
- [14] R. Riener, M. Guidali, U. Keller, A. Duschau-Wicke, V. Klamroth and T. Nef, "Transferring ARMin to the Clinics and Industry," *Top. Spinal Cord. Inj. Rehabil.*, vol. 17, no. 1, pp. 54-59, 2011.
- [15] C. Murray et al., "Global Burden of Diseases, Injuries and Risk Factors Study 2013," *The Lancet*, July 2014.
- [16] N. Schweighofer, Y. Choi, C. Winstein and J. Gordon, "Task-oriented rehabilitation robotics," *Amer. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 91, no. 11, pp. S270-S279, 2012.
- [17] Z. Zhang, W. Wong and J. Wu, "Ubiquitous Human Upper-Limb Motion Estimation using Wearable Sensors," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol.15, no.4, 2011.

- [18] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, et al., "Upper-Limb Robotic Exoskeletons for Neurorehabilitation: A Review on Control Strategies," *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, vol. 9, pp. 4-14, April 2016
- [19] T. Desplenter, A. Kyrylova, T. Stanbury, et al., "A wearable mechatronic for arm rehabilitation," 5th IEEE Inter. Conf. Biomed. Rob. Biomech., pp.491-496, August 2014.
- [20] I. Lamers, A. Maris, D. Severijns, et al., "Upper Limb Rehabilitation in People with Multiple Sclerosis: A Systematic Review," *Neurorehabil. Neural Repair.*, vol. 30, no.8, pp.773-793, September 2016.
- [21] H. Shing and S. Quan, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects," *Med. Eng. Phys.*, vol. 34, no.3, pp. 261-268, April 2012.
- [22] M. Babaiasl, S. Mahdioun, P. Jaryani and M. Yazdani, "A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke," *Disabil. Rehabil. Assist Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 263-280, January 2015.
- [23] R.A. Gopura, D.S. Bandara, K. Kiguchi and G.K Mann, "Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 75, pp. 203-220, January 2016.
- [24] B. Volpe, H. Krebs, N. Hogan, et al., "Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years," *Neurology*, vol. 53, no. 8, pp. 1874-1876, November 1999.
- [25] G. Prange, M. Jannink, C. Groothuis, et al., "Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 43, no. 2, pp.171-184, Mar-Apr 2006.
- [26] J. Mehrholz, T. Platz, J. Kugler, et al., "Electromechanical and robot assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke," *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 8, no.4, October 2008.
- [27] Office of the Chief Engineer-NASA, "Procedural Requirements," NPR 7120.8, February 2008.
- [28] T. Nef and R. Riener, "ARMin: Design of novel arm rehabilitation robot," 9th IEEE Conf. Rehab. Rob., pp.57-60, August 2005.
- [29] V. Klamroth-Marganska, J. Blanco, K. Campen et al., "Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial," *The Lancet Neurology*, vol. 13, no. 2, pp.159-166, February 2014.
- [30] R.Calabro, M. Russo, A. Naro, et.al., "Robotic gait training in multiple sclerosis rehabilitation: Can virtual reality make the difference? Findings from a randomized controlled trial," *J. Neurol. Sci.*, vol.377, pp.25-30, June 2017.
- [31] Hocoma. (2017). Home - Hocoma. [online] Available at: <https://www.hocoma.com/> [Accessed 26 Jun. 2017].
- [32] B. Volpe, H. Krebs, N. Hogan, "Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years," *Neurology*, vol.53, pp.1874 -1876, 1999.
- [33] Bionik Labs (2017), "InMotion ARM™ Interactive Therapy System," [online] Available at: <http://bionikusa.com/healthcarereform/upper-extremity-rehabilitation/inmotion2-arm/> [Accessed 26 Jun. 2017].
- [34] I. Treger, S. Faran and H. Ring, "Robot-assisted therapy for neuromuscular training of sub-acute stroke patients. A feasibility study," *Eur. J. Phys. Rehabil Med.*, vol.44, no.4, pp.431-5, December 2008.
- [35] F. Bovolenta, P.Sale, V. Dall'Armi, P. Clerici and M. Franceschini, "Robot-aided therapy for upper limbs in patients with stroke-related lesions. Brief report of a clinical experience," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol.8, April 2011.
- [36] S. Scott, "Apparatus for measuring and perturbing shoulder and elbow joint positions and torques during reaching," *J. Neurosci. Methods*, vol. 89, pp. 119-127, July 1999.
- [37] S. Ball, I. Brown and S. Scott, "MEDARM: a rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.4-7, September 2007.
- [38] E. Ruffaldi, M. Barsotti, D. Leonardi, et al., "Evaluating Virtual Embodiment with the ALEx Exoskeleton," *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling and Applications*, vol. 8618, pp. 133-140, 2014.
- [39] J. García, C.E. García, L. Monge, et al., "Mechanical Design of a Robotic Exoskeleton for Upper Limb Rehabilitation," *Advances in Automation and Robotics Research in Latin America*. I. Chang, et al. (Eds.) Springer International Publishing, pp.297-308, 2017.
- [40] M.A. Destarac, C.E. García, R. Salterén, et al., "Modeling and Simulation of Upper Brachial Plexus Injury," *IEEE Syst. J.*, vol.10, no.3, pp. 912-921, September 2016.
- [41] van Kammen K, Boonstra A, van der Woude L, et al. "Differences in muscle activity and temporal step parameters between Lokomat guided walking and treadmill walking in post-stroke hemiparetic patients and healthy walkers", *Neurorehabilitation and Neural Repair*, Vol 23, Issue 1, pp. 5 - 13, September 2008.
- [42] Domingo A, Lam T. "Reliability and validity of using the Lokomat to assess lower limb joint position sense in people with incomplete spinal cord injury". *J Neuroeng Rehabil*, 2014.
- [43] Chisholm AE, Alamro RA, Williams AM, Lam T. "Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review", *J Neuroeng Rehabil*. April 2017.
- [44] Aurich-Schuler T, Warken B, Graser JV, et al. "Practical Recommendations for Robot-Assisted Treadmill Therapy (Lokomat) in Children with Cerebral Palsy: Indications, Goal Setting, and Clinical Implementation within the WHO-ICF Framework", *Neuropediatrics*. August 2015.
- [45] AKoenig A, Wellner M, Köneke S, et al. "Virtual gait training for children with cerebral palsy using the Lokomat gait orthosis". *Stud Health Technol Inform*. 2008.
- [46] G. Zeilig, H. Weigarden, M. Zwecker, et al. "Safety and tolerance of the ReWalk™ exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: A pilot study". *Journal of Spinal Cord Medicine*, Volume 35, 2012.
- [47] T. Platz, A. Gillner, N. Borgwaldt, S. Kroll, and S. Roschka. "Device-Training for Individuals with Thoracic and Lumbar Spinal Cord Injury Using a Powered Exoskeleton for Technically Assisted Mobility: Achievements and User Satisfaction". *Biomed Res Int*. 2016.
- [48] P. Asselin, S. Knezevic, et al. "Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia". *J Rehabil Res Dev*. 2015.
- [49] Fineberg DB, Asselin P, Harel NY, et al. "Vertical ground reaction force-based analysis of powered exoskeleton-assisted walking in persons with motor-complete paraplegia". *J Spinal Cord Med*. pp.313-321, 2013.
- [50] Watanabe H, Goto R, Tanaka N, et al. "Effects of gait training using the Hybrid Assistive Limb® in recovery-phase stroke patients: A 2-month follow-up, randomized, controlled study". *NeuroRehabilitation Journal*, pp. 363-367, May 2017.
- [51] R. Kasai, S. Takeda. "The effect of a Hybrid Assistive Limb on sit-to-stand and standing patterns of stroke patients". *Journal of Physics Therapy Science*, June 2016.
- [52] T. Yoshimoto, I. Shimizu, Y. Hiroi. "Sustained effects of once-a-week gait training with hybrid assistive limb for rehabilitation in chronic stroke: case study". *Journal of Physics Therapy Science*. Sep. 2016.
- [53] Russo A, Endersby K, Perret M, et al. "A robotic exoskeleton to provide increased mass practice for gait training and its impact on discharge destination for individuals with acute stroke". *Poster Presentation. ISC Meeting*; February 2016.
- [54] Hohl K, Deems-Dluhy SL, Jayaraman A, Scanlan K. "Exoskeleton gait training for individuals affected by severe, chronic stroke". *Platform Presentation. ACRM Meeting*; November 2016.
- [55] Kozlowski AJ, Bryce TN, Dijkers MP. "Time and Effort Required by Persons with Spinal Cord Injury to Learn to Use a Powered Exoskeleton for Assisted Walking". *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2015.
- [56] Kolakowsky-Hayner, Stephanie A., et al. "Safety and feasibility of using the Ekso™ bionic exoskeleton to aid ambulation after spinal cord injury" *J Spine* 4, 2013.
- [57] Spencer A., Kevin H., and Michael G. "An Assistive Controller for a Lower-Limb Exoskeleton for Rehabilitation after Stroke, and Preliminary Assessment Thereof". *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2015.
- [58] Ekelem A, Murray S, Goldfarb M. "Preliminary assessment of variable geometry stair ascent and descent with a powered lower limb orthosis for individuals with paraplegia". *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2015.
- [59] Farris RJ, Quintero HA, Goldfarb M. "Performance evaluation of a lower limb exoskeleton for stair ascent and descent with paraplegia". *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2012.
- [60] H. Quintero, R. Farris, C. Hartigan, et al. "A Powered Lower Limb Orthosis for Providing Legged Mobility in Paraplegic Individuals". *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2011.
- [61] Eurostat (2017, June 28), "Healthcare personnel statistics - dentists, pharmacists and physiotherapists", [online] Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/>.
- [62] "Rehabilitation Robots: Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2016 to 2022", Winter Green Research, United States, March 2015.