

Exoesqueletos de miembro superior: necesidades de usuario y soluciones tecnológicas.

L. Amigo Vásquez, A. Casals Gelpí

Institut de Bioenginyeria de Catalunya. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.

luis.amigo@upc.edu, alicia.casals@upc.edu

Resumen

En el campo de la rehabilitación del miembro superior, la robótica va jugando cada día un papel más importante a la hora de desarrollar nuevas investigaciones que optimicen el proceso de recuperación del paciente, lo que se ve reflejado en la gran cantidad de exoesqueletos robotizados orientados a rehabilitación que se están diseñando e investigando.

Este trabajo presenta una revisión del estado del arte en ortesis robotizadas del miembro superior y plantea los desafíos que quedan aún por resolver en el campo.

1. Introducción

Las terapias de rehabilitación son supervisadas por especialistas en la materia. Dependiendo del tipo y grado de la lesión, el procedimiento terapéutico puede durar meses, lo cual conlleva una cantidad de tiempo y recursos considerables. Por otro lado, muchas terapias requieren la dedicación exclusiva del terapeuta a un paciente, por lo que la eficiencia se ve considerablemente disminuida. Gracias a los avances científicos y tecnológicos, hoy en día diversas instituciones han estudiado y desarrollado dispositivos robóticos basados en la biomecánica del miembro superior que permiten desarrollar terapias rehabilitadoras de forma eficiente y con mejores resultados que las terapias manuales, con lo cual se ha logrado disminuir el tiempo de terapia, recuperación, recursos y además se han obtenido otras ventajas importantes como es la medición y un control exacto del movimiento, velocidad, aceleración, fuerzas y momentos que se desarrollan durante la terapia y la evaluación bajo estos parámetros de la evolución del paciente.

Este trabajo presenta una revisión del estado del arte en dispositivos robóticos orientados a la asistencia y a la rehabilitación del miembro superior, enfocándose hacia sus características biomecánicas y en las terapias capaces de realizar. Se presenta además una clasificación de los exoesqueletos según su funcionalidad terapéutica y se especifican las características que deben tener para catalogarlos en uno u otro tipo.

2. Estado del arte

En general, un exoesqueleto que quiera reproducir los movimientos del miembro superior en su totalidad debe poseer al menos los 7 grados de libertad (GDL) de la extremidad, los cuales son:

- 3 GDL para el hombro: (1) Flexo-extensión, (2) abducción-aducción y (3) rotación interna-externa.
- 1 GDL para el codo: (1) Flexo-extensión.
- 3 GDL para la muñeca: (1) Flexo-extensión, (2) abducción-aducción y (3) pronosupinación.

Muchas veces la pronosupinación se asocia a un movimiento de la muñeca y otras al codo, sin embargo es un movimiento del antebrazo que involucra ambas articulaciones en conjunto; para el caso, se va a asociar a un GDL de la muñeca.

Ahora bien, el uso de exoesqueletos no se ha remitido sólo al ámbito rehabilitador, también se han expandido a la asistencia para pacientes con problemas musculares o neuromusculares a través del uso de ortesis y a la aumentación de las habilidades del miembro superior, como es la resistencia, la fuerza, precisión, etc.

En este sentido es posible distinguir tres clases de exoesqueletos: asistencial, de rehabilitación y de aumentación (Figura 1).



Figura 1. Clasificación de los exoesqueletos

Los exoesqueletos asistenciales actúan como una ortesis y tienen como objetivo soportar el peso del miembro superior y a su vez pequeñas cargas aplicadas sobre éste en la vida cotidiana. Además asisten al movimiento, dirigiéndolo y controlándolo según la biomecánica y los grados de libertad de la extremidad (GDL). Son por lo tanto portátiles para su uso diario.

Los exoesqueletos para rehabilitación pueden ser portátiles o no, dependiendo de su uso y diseño. Trabajan en el rango de fuerza humana y están diseñados para desarrollar tareas y ejercicios que estimulen la recuperación de tejidos musculares, articulaciones, transmisiones neuromusculares, etc. Se utilizan cuando por algún traumatismo, lesión deportiva u ocupacional, enfermedad degenerativa o lesiones cerebrales se pierde parcial o totalmente la movilidad y fuerza en el miembro superior y se busca la recuperación parcial o total de las capacidades de éste.

Los exoesqueletos de aumentación buscan aumentar las capacidades naturales del ser humano, específicamente las referidas al miembro superior. Pueden ser portables o no portables, según sea para aumentar la resistencia y la fuerza de la persona o para aumentar los sentidos, precisión y exactitud de los movimientos.

En este artículo, se enfocará la revisión a los exoesqueletos asistenciales y de rehabilitación, ya que son los de interés en terapias de ayuda a pacientes con discapacidades motoras.

2.1. Dispositivos asistenciales

En el área asistencial se han desarrollado dispositivos enfocados a paliar las consecuencias derivadas de lesiones medulares, enfermedades degenerativas, parálisis cerebrales, accidentes cerebrovasculares y otros problemas neuromusculares que afectan el normal desarrollo de la vida diaria así como asistir a ancianos y a personas físicamente débiles. La mayoría de estas dolencias acarrear graves alteraciones motoras, como debilidad muscular, hemiparesia, atrofia muscular, contracturas, entre otras.

Así, [1] desarrolló un exoesqueleto que busca no sólo asistir al movimiento en actividades de la vida diaria de personas ancianas o con debilidades musculares, sino también aumentar su percepción. Cuenta con 4 GDL (hombro: (1) (2) (3) y codo: (1)). Posee 12 sensores EMG y un sensor de fuerza en la muñeca para el control, además de una cámara de visión y un sensor de ultrasonido para asistir a la percepción del paciente y evitar así colisiones, además de asegurar que la trayectoria que se desea tomar hacia el objeto así como la acción que se quiere efectuar sobre este sean las correctas. El control del exoesqueleto es a través de las señales EMG y busca identificar la intención del movimiento del usuario para accionar el exoesqueleto, mientras que su estrategia de control es por control de impedancia. Si bien es cierto que la cámara y los sensores de ultrasonido permiten evitar colisiones modificando el recorrido del exoesqueleto, esto no significa que se aumente la percepción del paciente, ya que él no puede reajustar la trayectoria ni tampoco se posee un *biofeedback* que le permita saber que se va a producir una colisión. Por otro lado, los ejes de rotación de la articulación mecánica del hombro y codo no coinciden con los biológicos, lo cual puede generar incomodidad al usuario durante un uso prolongado de la ortesis. Otro inconveniente es la dificultad de control debido a la naturaleza inestable de las señales EMG y a un rango muy limitado de movimientos.

Enfocándose en pacientes infantiles con distrofia muscular, lesiones medulares, parálisis cerebral o que hayan sufrido accidentes cerebrovasculares se desarrolló *WREX* [2], un exoesqueleto robótico pasivo de 4 GDL (hombro: (1) (2), codo: (1), posee además una articulación adicional en el codo para compensar la ausencia de la rotación de éste). Posee bandas elásticas que compensan el peso del brazo y proveen una sensación de ingravidez de la extremidad superior. Se puede acoplar a cualquier silla de rueda así como a un soporte ubicado en la espalda lo que le permite ser portable. Actualmente está siendo

comercializado por *Jaeco Orthopedic* (Figura 2) y se ha logrado que niños con debilidades musculares sean capaces de comer por sí solos así como efectuar tareas de manipulación. Además posee un diseño sencillo y liviano, lo que permite compensar el desalineamiento de los ejes de rotación del brazo con los del exoesqueleto.



Figura 2. *WREX*, Hospital for Childrens, Wilmington.

Figura 3. *RUPERT IV*, Arizona State University

Más general y orientándose a usuarios que han sufrido lesiones deportivas, ocupacionales, medulares o con lesiones neuromotoras, se desarrolló el *RUPERT IV* [3] (Figura 3), diseñado para asistir en tareas repetitivas de la vida diaria, ya que es portable y tiene un bajo peso. Posee 5 DGL (hombro: (1) (3), codo: (1) y muñeca: (1) (3)). Está actuado por músculos neumáticos y su estructura está diseñada por materiales compuestos de grafito. Sin embargo, posee un movimiento demasiado limitado en el hombro lo que reduce sustancialmente su aplicabilidad.

Uno de los desarrollos más completos es el traje *HAL* [4], cuya 5ª versión se encuentra comercializada por la empresa *Cyberdyne Systems*. Está diseñado para asistir el movimiento de todo el cuerpo en personas con desordenes musculares o problemas de parálisis tanto cerebral como medular, aunque también puede ser utilizado como sistema de rehabilitación e incluso de aumentación de la fuerza y resistencia de una persona. Posee dos sistemas de control, el primero a través de sensores EMG que persiguen identificar la intención del movimiento gracias a los patrones en las señales y a la identificación de la activación muscular, y un segundo basado en patrones de marcha y movimientos que son guardados la primera vez que el usuario se coloca el traje y son utilizados para ajustar los movimientos que se realizan.

En una línea asistencial distinta, se encuentra el exoesqueleto *WOTAS* [5] de 3 GDL (codo: (1), muñeca (1) (3)), el cual se desarrolló para cancelar el temblor patológico en miembros superiores causado por lesiones cerebrales, condiciones neurológicas anormales o enfermedades degenerativas como el parkinson y estudiar este tipo de trastornos de movimiento. A través de sus sensores es posible determinar la amplitud, frecuencia y fase de la vibración ocasionada por el temblor y ejercer sobre la extremidad una fuerza dinámica que se contraponga al movimiento tal que cancele el temblor, sin oponer resistencia a los movimientos voluntarios de la persona. También puede variar las propiedades biomecánicas del brazo (rigidez, viscosidad y amortiguamiento) como otra forma de cancelar el temblor.

2.2. Dispositivos de rehabilitación

En el desarrollo de terapias para rehabilitación cada vez son más utilizados los exoesqueletos gracias a su gran confiabilidad, repetibilidad y precisión en sus tareas y gracias a que son una buena herramienta para evaluar la evolución del paciente y la efectividad de la terapia.

Para terapias de rehabilitación en general, se está desarrollando el *ABLE* [6], que cuenta con 4 GDL (hombro: (1) (2) (3), codo: (1)) (Figura 4). Está soportado por una base fija, de tal forma que su peso de 13 Kg. no lo absorba la persona. Los ejes de rotación del exoesqueleto se encuentran alineados respecto a las articulaciones del brazo, lo que minimiza el efecto del desalineamiento, sin embargo esto está condicionado a que la muñeca quede libre para que pueda existir un movimiento relativo entre el antebrazo y el exoesqueleto tal que el brazo pueda acomodarse frente a los desalineamientos producidos durante el movimiento.



Figura 4. *ABLE*, CEA-LIST

Figura 5. *ARMin III*, ETH de Zurich

Pensando en personas que han sufrido de accidentes cerebrovasculares, se ha desarrollado el *Armin III* [7] (Figura 5). Posee 6 GDL (hombro: (1) (2) (3), codo: (1) y muñeca: (1) (3)), realiza tareas de movimientos repetitivos basados en control de impedancia o admitancia. Acompaña al sistema un programa en ambiente virtual que realiza una serie de juegos que ayudan a la rehabilitación del paciente. El inconveniente es su gran volumen, lo cuál sólo lo hace apropiado para clínicas espaciales.

En la misma línea, para pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares, se desarrolló el *MEDARM* [8], un robot de rehabilitación del complejo hombro-codo, cuya prioridad es poder controlar los diferentes movimientos de forma independiente. Posee 6 GDL, de los cuales 4 son para los movimientos del hombro (1) (2) (3) y el codo (1) y 2 son para la articulación esternoclavicular que le permite elevarse/bajarse y prolongarse/retraerse, con el fin de ajustarse a los diferentes tamaños de las personas, además de compensar y estabilizar el movimiento del hombro. El sistema está accionado por un mecanismo de cables y poleas, el cual permite que el miembro superior se mueva en el entorno de trabajo del robot. Si bien, gracias a los 5 GDL del hombro el exoesqueleto permite ajustar el centro de rotación del hombro de acuerdo a los diferentes tamaños de las personas y evitar desalineamientos durante la ejecución de movimiento, el costo ha sido un estructura

muy poco portable, que ocupa un espacio considerable y en consecuencia poco aceptable por los usuarios.

Para pacientes con graves alteraciones motoras que han sufrido un accidente cerebrovascular crónico y presentan una severa hemiparesia, se desarrolló el *T-WREX* [9], el cual utiliza una ortesis que asiste al movimiento, sensores y un programa informático que simula actividades funcionales. Se utiliza un exoesqueleto con 5 GDL pasivos, el cual a través de bandas elásticas, sostiene el peso del brazo y permite asistir al movimiento de este y rehabilitarlo. Se adaptó el *WREX* para adultos añadiéndose además sensores en cada articulación para permitir el estudio de los movimientos del brazo y un sensor en la mano que permite medir la acción de agarre. Posteriormente *Hocoma Inc.* comercializó el primer prototipo bajo el nombre de *Armeo®*, cambiando las bandas elásticas por un sistema de resortes y añadiendo una interfaz avanzada de realidad virtual para motivar al paciente durante la ejecución de la terapia. Se apoya en una base móvil lo que le permite trasladarse y ajustarse según el tamaño del paciente, además de poder ser usado en sillas de ruedas.

Por otro lado, para usuarios con debilidad muscular ocasionada por trastornos neuromusculares y lesiones del sistema nervioso central, se desarrolló un exoesqueleto [10] que posee los 7 GDL de la extremidad superior. Es controlado a través de un microprocesador que "predice" el movimiento a efectuar gracias a sensores EMG ubicados en partes específicas del brazo. Dependiendo de los algoritmos de control, puede ser utilizado tanto en terapias de rehabilitación como para aumentación de las capacidades del brazo.

Para la rehabilitación de una amplia gama de lesiones, enfermedades y otras condiciones como lesiones deportivas, ocupacionales, de la médula espinal y también para personas que han sufrido de accidentes cerebrovasculares se diseñó el *SALFORD* [11] que pesa 2 Kg debido a que utiliza como actuadores músculos neumáticos por su alta relación potencia/peso. Reproduce los 7 GDL de la extremidad superior lo que le permite cubrir casi un 90% del espacio de trabajo del brazo. Su gran problema es el comportamiento altamente no lineal de sus actuadores neumáticos, presentando desafíos a la hora del control.

Un diseño innovador es el desarrollado en [12], cuyo principal objetivo es el proporcionar una herramienta rehabilitadora para el complejo articular del hombro. Posee 5 GDL (hombro (1) (2) (3) más un grado de libertad para la escápula y el codo (1) que persiguen mantener los ejes de rotación de la articulación del hombro alineados con el centro de rotación de la articulación glenohumeral para evitar desalineamientos que ocasionen molestias, lesiones y rechazo a la terapia.

Siguiendo esta premisa, en [13] se desarrolló un exoesqueleto redundante para telemanipulación con retroalimentación de fuerza de 16 GDL que buscan reproducir los 7 GDL de la extremidad superior. Si bien no está diseñado de forma específica para la rehabilitación, sí se rescata el objetivo de disponer de

más grados de libertad en las articulaciones mecánicas para compensar los desalineamientos entre centros de rotación de las articulaciones del exoesqueleto con las del brazo, producidas por el movimiento natural de éste. Estos desalineamientos producen esfuerzos sobre las articulaciones de la extremidad ocasionando dolor, molestias e incomodidad.

Basados en el estudio de los desarrollos mostrados anteriormente, la investigación en nuestro grupo se orienta al diseño de un exoesqueleto para rehabilitación que contemple al menos 6 GDL del miembro superior, cuyas características principales serían el bajo volumen/peso, portabilidad, que sea capaz de adecuarse a las diferentes medidas antropocéntricas del brazo y además que sea capaz de compensar los desalineamientos de los ejes producidos durante el movimiento. Con respecto al control, la prioridad es que sea capaz de rehabilitar acciones, no movimientos y se base en la premisa *assisted as needed*.

3. Conclusiones

En los desarrollos anteriores es posible ver diferentes formas de afrontar la problemática de desarrollar un exoesqueleto que sea capaz de reproducir los movimientos de la extremidad superior y de asistir, rehabilitar o aumentar sus capacidades. Sin embargo no existe el diseño perfecto, ya que cada uno conlleva ventajas en ciertos aspectos y desventajas en otros, y es que el cuerpo humano y su comportamiento biomecánico es un desafío que hoy por hoy nos es imposible de superar, aunque se están desarrollando los esfuerzos en busca de reproducir lo más fielmente la cinemática y dinámica de la extremidad superior.

Se ha podido comprobar que los exoesqueletos con mejores resultados son los que reducen el complejo articular del hombro a una articulación esférica de 3GDL cuyos ejes intersectan el centro de la articulación glenohumeral, mientras que para el codo se persigue alinear los ejes de su articulación con la del exoesqueleto.

Dentro de este contexto se encuentra la problemática de la alineación de los ejes de rotación del exoesqueleto con los del brazo durante el movimiento, situación que falta por resolver y que puede generar durante el uso prolongado incomodidad, molestias y hasta rechazo de la terapia.

Por otro lado hay diferentes maneras de controlar un exoesqueleto, sin embargo la mayoría trabaja bajo la premisa de rehabilitar movimientos. Hoy en día, los terapeutas buscan que el exoesqueleto asista sólo lo justo y necesario (*assisted as needed*) e incluso van más allá, que el control se trabaje no desde la perspectiva de rehabilitar movimientos, sino acciones. En este aspecto todavía falta desarrollo y las nuevas investigaciones apuntan hacia esa dirección.

Respecto al diseño, es evidente que es necesario disminuir el tamaño y peso de los exoesqueletos, un desafío es el mejorar la portabilidad, ergonomía y comodidad del usuario, sobre todo en exoesqueletos asistenciales.

Referencias

- [1] Kiguchi K, Liyanage M. A study of a 4dof upper-limb power-assist intelligent exoskeleton with visual information for perception-assist. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'08)*, Pasadena, 2008, pp 3666-3671 (ISBN: 978-1-4244-1647-9).
- [2] Rahman T, et al. Passive exoskeletons for assisting limb movement, *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol 43, sup 5, 2006, pp 583-590 (ISSN: 0748-7711).
- [3] Balasubramanian S, et al. RUPERT: an exoskeleton robot for assisting rehabilitation of arm functions. *Virtual Rehabilitation '08*, Vancouver, 2008, pp 163-167 (ISBN: 978-1-4244-2700-0).
- [4] Web de CYBERDINE Inc. <http://www.cyberdyne.jp>
- [5] Rocon E, Ruiz AF, Pons JL, Belda-Lois JM, Sánchez-Lacuesta JJ. Rehabilitation robotics: a wearable exoskeleton for tremor assessment and suppression. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*. Barcelona, 2005, pp 2271-2276 (ISBN: 0-7803-8914-X).
- [6] Garrec P, Friconneau JP, Méasson Y, Perrot Y. ABLE, an innovative transparent exoskeleton for the upper-limb. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'08)*, Nice, 2008, pp 1438-1488 (ISBN: 978-1-4244-2057-5).
- [7] Nef T, Mihelj M, Kiefer G, Pendl C, Muller R, Riener R. ARMin exoskeleton for arm therapy in stroke patients. *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR'07)*, Holland, 2007, pp 68-74 (ISBN: 978-1-4244-1320-1).
- [8] Ball SJ, Brown I, Scott SH. MEDARM: a rehabilitation robot with 5dof at the shoulder complex. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'07)*, Zurich, 2007, pp 1-6 (ISBN: 978-1-4244-1264-8).
- [9] Sanchez RJ, et al. Automating arm movement training following severe stroke: functional exercises with quantitative feedback in a gravity-reduced environment. *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol 14, sup 3, 2005, pp 378-389 (ISSN: 1534-4320).
- [10] Perry JC, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol 12, sup 4, 2007, pp 408-417 (ISSN: 1083-4435).
- [11] Tsagarakis NG, Caldwell DG. Development and control of a 'soft-actuated' exoskeleton for use in physiotherapy and training. *Autonomous Robots*, vol 15, sup 1, 2003, pp 21-33 (ISSN: 0929-5593).
- [12] Carignan C, Liszka M, Roderick S. Design of an arm exoskeleton with scapula motion for shoulder rehabilitation. *International Conference on Advanced Robotics (ICAR'05)*, Seattle, 2005, pp 524-531 (ISBN: 0-7803-9178-0).
- [13] Schiele A, Visentin G. The ESA human arm exoskeleton for space robotics telepresence. *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, Nara, 2003.