

Exoesqueleto bípedo: revisión del estado del arte

Paúl F. Lucero G., Freddy P. Guillén M. y Martín S. Sánchez C.¹⁷

El presente documento muestra las diferentes etapas que implica la marcha como tal, un análisis sobre las distintas etapas que se tiene al realizar la caminata, sus diferentes reacciones sobre las articulaciones de las extremidades inferiores tales como cadera, rodilla y tobillo.

Exoesqueleto

El desarrollo de exoesqueletos inició por proyectos inspirados en el esqueleto exterior que tienen algunos animales (insectos y crustáceos). En la actualidad ha empezado a comercializar esta tecnología para adaptarlas al cuerpo humano (esqueletos robóticos). En los años 60 la empresa General Electric empezó a desarrollar el proyecto denominado Hardiman I (figura 1a), como parte de un proyecto en conjunto con Navy-Army en noviembre de 1965, diseñado para incrementar la fuerza y resistencia de quien lo usara, empleándolo para la carga, descarga, apilar y mover la carga de un lugar a otro, y otras tareas asociadas a esto; constaba de 30 servomandos, accionados hidráulicamente y ensambladas mecánicamente (Makinson, 1971).

El objetivo del exoesqueleto se ha mantenido, sin embargo, producto de las alternativas constructivas actuales, estas estructuras son más estéticas y orientadas a un mayor número de aplicaciones, pues al ser más sofisticados los usan el ejército estadounidense (Raytheon y HULC-Human Universal Load Carrier), aplicados a soldados con el fin de transportar mayores cargas), lograr el cambio necesario de la resistencia mecánica para las diversas aplicaciones (levantar grandes masas, andar, correr, etc.) en tiempo real. Entre las aplicaciones de los exoesqueletos se puede citar la rehabilitación de personas que han perdido la oportunidad de caminar en una o en ambas piernas (paraplejía inferior). Un exoesqueleto que es únicamente para piernas y faculta a la persona para andar mediante un mando controlado por el usuario es desarrollado por la compañía Rex Robotics, robot que se lo espera comercializar en Nueva Zelanda en este año con un costo de 150.000 USD (Estévez, 2011). Un modelo que se puede alquilar y es controlado por la mente existe en Japón, se encuentra destinado a auxiliar tareas cotidianas tales como paseos, permanecer de pie largo rato o levantar grandes pesos, la duración de la batería es de 5 horas (Dremyn, 2008). El prototipo llamado HAL (Hybrid Asisted Limbed) (figura 1a) posee dos sistemas de control que trabajan conjuntamente, su funcionamiento está basado en la acción que tiene la persona al tratar de caminar y posee biosensores eléctricos adheridos a la piel y ayudan

17 Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca-Ecuador, Escuela de Ingeniería Electrónica, mención de Sistemas Industriales.

a leer las señales, las mismas que son analizadas para saber la cantidad de energía que el usuario tiene la intención de generar y calcula la cantidad necesaria de fuerza, enviando la señal requerido para que los dispositivos de potencia ejerzan el torque requerido para ejercer la fuerza, poniendo las extremidades en movimiento (Dremyn, 2008).

Figura 1
Exoesqueleto desarrollado por General Electric (a)
Exoesqueleto HAL (b)



Fuente: Estévez, 2011; Dremyn, 2008.

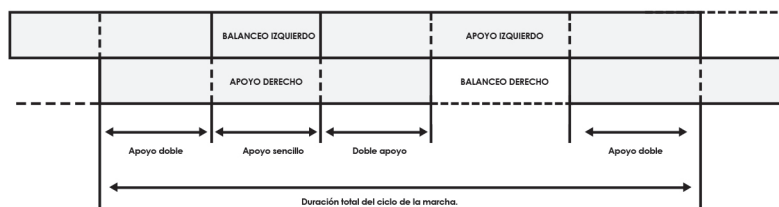
Las señales de ingreso que controlan un exoesqueleto pueden ser adquiridas por del cuerpo humano, controlados por la mente o simplemente por un mando. Se debe considerar que los grados de libertad siempre son una limitante, pues las articulaciones se encuentran realizadas por servomotores (en su mayoría), con lo que el par resistente que oponen estos motores son distintos debido a que se usa diferente par al realizar las actividades, por ejemplo: el esfuerzo que un músculo realiza al caminar es distinto al que se emplea al correr, con esto, un exoesqueleto debe poseer algunos modos de funcionamiento y a la vez una reacción rápida para modificar sus parámetros (Estévez, 2011). Al encontrarse adaptado al cuerpo humano, un esqueleto robótico no necesariamente debe ser de cuerpo completo, puede aplicarse a las extremidades superiores o inferiores (Estévez, 2011).

La mayoría de los reportes de exoesqueletos pertenecen al desarrollo de industrias norteamericanas y europeas, en donde la investigación y tecnología mayo que en América Latina, debido principalmente a que se han vinculado muchas de las disciplinas ingenieriles con la de las ciencias médicas o biomédicas. Sin embargo, también se encontró reportes de proyectos en donde se observa esta fusión interdisciplinaria en México y Colombia (Hernández, 2008; Martínez y Romero, 2010). Ecuador, al igual que la mayoría de países sudamericanos, presenta muy pocas y hasta escasas patentes anuales, producto de la ausencia de investigación en general y pocos proyectos de ámbito interdisciplinario con perspectivas biomédicas.

La marcha humana

Conocer el ciclo de marcha es la base para el desarrollo de exoesqueletos por lo que se considera necesario indicar sus conceptos. Se conoce como marcha humana al proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano se desplaza de un lugar a otro iniciando de pie y el peso del mismo se encuentra soportado por los dos miembros inferiores de manera alternada (biomecánica de la marcha) (Collado Vázquez, 2002; Arce, 2009). Se alcanza una marcha normal bípeda a través de una combinación compleja de componentes posturales automáticos y voluntarios, conocidos como volitivos y demanda la estabilidad que otorga el soporte antigravitatorio del peso corporal, la movilidad de los segmentos corporales y el control motor a la secuencia de múltiples segmentos mientras transfiere el peso del cuerpo de una extremidad a otra.

Figura 2
Representación de las principales componentes de la marcha



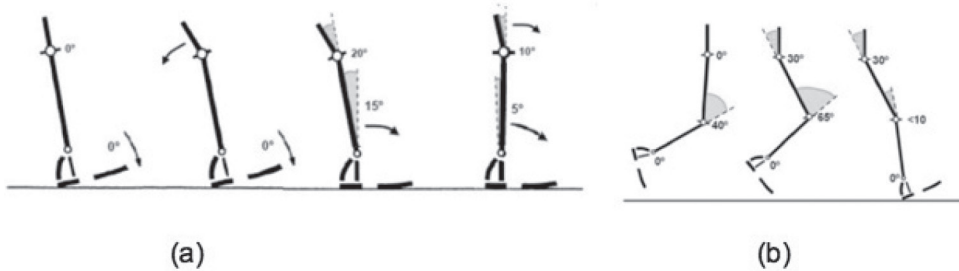
Fuente: Hernández, 2008.

Se puede analizar la biomecánica de la marcha en dos fases: apoyo y oscilación.

1. Biomecánica de la fase de apoyo de la marcha. La fase de apoyo propiamente dicha, inicia en el instante en el que el talón entra en contacto con el suelo y finaliza con el despegue de los dedos. Un periodo de doble apoyo que caracteriza la marcha es la división en dos fases del contacto del metatarsiano del pie y de la punta de los dedos, cabe recalcar que este fenómeno no ocurre en la carrera, dicho apoyo interviene de la siguiente forma en distintas partes del cuerpo (columna vertebral y pelvis, cadera, rodilla, tobillo y pie) (Collado, 2002).

2. Biomecánica de la fase de oscilación de la marcha. Es la continuación del proceso anterior, por lo que inicia con el despegue de los dedos y finaliza con el choque del talón, de manera similar, intervienen algunas partes del cuerpo como columna y pelvis, cadera, rodilla, tobillo y pie.

Figura 3
 Cinemática de la rodilla y tobillo cuando el talón
 hace contacto con el suelo y el punto de apoyo medio (a)
 Cinemática de la rodilla y cadera en la etapa de oscilación (b)



Fuente: Hernández, 2008.

Se puede realizar un análisis basado en tres intervalos y se puede describir cómo actúan el tobillo, rodilla y cadera en el plano sagital para cada una de las fases (Hernández, 2008).

Sistemas de control

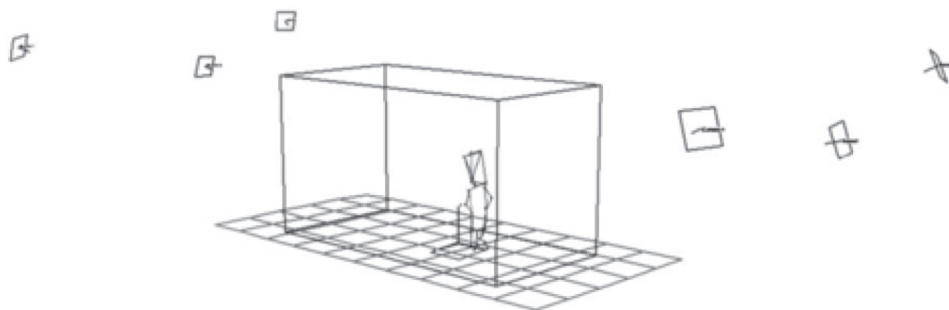
Las prestaciones que poseen los diferentes exoesqueletos deben poseer un comando y un ente regularizador, y es en este punto en particular donde la ingeniería juega un papel fundamental en la automatización y control de cada actuador colocado en los exoesqueletos para lograr un trabajo grande con un esfuerzo mínimo. El exoesqueleto utiliza controladores robóticos PID pues son programables, logrando una salida deseada ante un ingreso a este controlador; es así que el exoesqueleto de Sarcos para la entrada levantar una gran masa dará una salida de multiplicar fuerza del ser humano, con lo que el usuario utiliza una fuerza mínima para un trabajo grande. Autores como Kazerooni proponen una interacción entre la persona y el exoesqueleto mediante la transferencia de potencia y señales de información (Ruiz Olaya, 2008; Kazerooni, 1990), con lo que la persona y el dispositivo robótico establecen un lazo cerrado de un sistema controlado por impedancia, donde las propiedades dinámicas del sistema total son moduladas para tener un sistema estable (Ruiz, 2008). Varios robots biomiméticos usan actuadores neumáticos (McKibben, 1999), donde hay que tener en cuenta las características no lineales que posee esta tecnología (Ruiz, 2008; Klute, Czerniecki y Hannaford, 1999). Dependiendo del uso y aplicación del dispositivo existen algunos esquemas de control, aparte de los mencionados con anterioridad están: control de posición, control de fuerza/par, control de admitancia, control de impedancia, control de fuerza-posición o híbrido (Ruiz, 2008).

Aplicaciones

El desarrollo de esta tecnología requiere un equipo multidisciplinario de ingenieros y profesionales biomédicos, por lo que un laboratorio de marcha es un sistema de herra-

mientas muy importante y necesaria para poder analizar de forma cuantitativa los patrones de movimiento, pues proporciona seguimiento, diagnóstico, tratamiento y asistir al planteamiento de métodos de rehabilitación en patologías ligadas con la marcha.

Figura 4
Reconstrucción tridimensional de un laboratorio de seis cámaras



Fuente: Hernández, 2008.

Cuantificar el movimiento de la marcha da a los especialistas la información necesaria para deducir una patología, determinando que tanto conviene uno u otro método usando laboratorios de marcha (figura 4), en el que se cuantifica patrones cinemáticos como dinámicos (figura 5), activación y gasto muscular y energético; los valores tomados son aprovechados para poder ponderar aquellas alteraciones de la marcha en fisioterapia, ortopedia, rehabilitación, reumatología y también para asociar trastornos del aparato locomotor que tienen origen neurológico (Martínez *et al.*, 2010).

Figura 5
Flexo-extensión máxima de cadera (a)
Flexo-extensión máxima de rodilla (b)
Flexión plantarflexión dorsal máxima de tobillo (c)



Fuente: Hernández, 2008.

Conclusiones

En el desarrollo de exoesqueletos es indispensable realizar estudios a un número considerable de personas con y sin dificultades motrices, compararlas y revisar sus diferencias a fin de proponer una opción que les permita mejorar su condición de vida.

Un laboratorio que permita cuantificar patrones de movimiento que proporcionan información valiosa es importante, no solo para el desarrollo de tecnología, sino para dar una evaluación lo suficientemente precisa de patologías.

Estudiantes y docentes latinoamericanos y sobretodo ecuatorianos, deben excluir la idea de que en el país no se puede investigar, si bien el realizar una investigación implica tiempo, pruebas, errores; una investigación debe poder brindar una solución de mejoramiento de estilo de vida a personas que circulan en nuestro entorno, más no, hacer que encajen investigaciones de otros lados en nuestras personas, esto se lo puede lograr si empezamos a vincularnos entre especialidades ingenieriles y médicas, como propone esta revisión.

El hecho de no poseer la tecnología con los que cuentan los países desarrollados, como sus industrias, no debe ser tomada como un limitante al momento de desarrollar aplicaciones, se puede adquirir, desarrollar o habilitar herramientas de software como de hardware que permita potencializar las funciones de la tecnología con la que se cuenta.

El análisis matemático como fisiológico es altamente relevante en el diagnóstico, tratamiento e implementación de aplicaciones enfocadas a brindar al paciente una inclusión moderadamente rápida a la sociedad, por lo que el enlazar proyectos en donde se junten a profesionales en estas áreas es una prioridad que debe involucrar a alumnos, docentes e investigadores.

Comprender el proceso complejo que se realiza al caminar, agregando análisis dinámico y cinemática implicada, en un compendio entre profesionales robóticos y biomédicos, permitirá desarrollar proyectos en conjunto que otorgue a un paciente un digno estilo de vida, usando exoesqueletos cómodos, estudiados y personalizados, que no representarán problemas a ninguna parte del cuerpo, provocada por el uso de un dispositivo externo.

Referencias

- Arce, C.
2009 "Análisis biomecánico de la marcha". Recuperado el 4 de julio de 2012. <http://es.scribd.com/doc/16988325/Analisis-Biomecanico-de-la-Marcha>
- Azorín Lizán, M., Pina Serrano, M. y Martínez Payá, J.
2005 *Revista de Fisioterapia*. Universidad Católica San Antonio. España. Recuperado el 9 de julio de 2012. <http://www.ucam.edu/revistafisio/numeros/volumen-4/numero-1-julio-2005/vol.4-no1-art.1.pdf>
- s.f. Biomecánica de la Marcha. Recuperado el 5 de julio de 2012. <http://www.terapia-fisica.com/biomecanica-de-la-marcha.html>
- Collado Vázquez, S.
2002 "Análisis de la marcha humana con plataformas dinamométricas. Influencia del transporte de carga". Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Medicina. Departamento de Medicina Física y de Rehabilitación. Recuperado el 9 de julio de 2012. <http://eprints.ucm.es/4401/1/med3.pdf>

- Dremyn, P.
2008 "El exoesqueleto humano". Recuperado el 9 de julio de 2012. <http://dremyn.blogspot.com/2008/04/el-exoesqueleto-humano.html>
- Estévez, J.
2011 "Exoesqueletos mecánicos: de momento, la ficción gana". Recuperado el 9 de julio de 2012. <http://amazings.es/2011/04/26/exoesqueletos-mecanicos-de-momento-la-ficcion-gana>
- Hernández, F.
2008 "Colección de tesis digitales". Universidad de las Américas de Puebla. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. Recuperado el 27 de junio de 2012. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/capitulo3.pdf
- Kazerooni, H.
1990 "Human-robot interaction via the transfer of power and information signals". *IEEE Transaction On Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 20. Nº 2, pp. 450-463.
- Klute, G. K., Czerniecki, J. M. y Hannaford, B.
1999 "Mckibben artificial muscles: Pneumatic actuators with biomechanical intelligence". *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.
- Makinson, B. J.
1971 "Research and Development Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance". Hardiman I Project. DTIC Document. Recuperado el 20 de julio de 2012. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0724797>
- Martínez Carrillo, F. y Romero Castro, E.
2010 "Desarrollo de un laboratorio de marcha con integración sincrónica mediante una arquitectura en módulos". *Journal Acta Biológica Colombiana*. Vol. 15. Nº 3, pp. 235-250.
- Ruiz Olaya, A. F.
2008 "Sistema robótico multimodal para análisis y estudios en biomecánica, movimiento humano y control neuromotor".
- Universidad Carlos III de Madrid
2012 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/5636/1/Tesis_Andres_Felipe_Ruiz_Olaya.pdf
- Universidad del Valle
2004 Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Cursos. Recuperado el 8 de julio de 2012. <http://www.univalle.edu.co/~automatica/Cursos/MoldelaPreg/Material/CNL1.pdf>
- Villa Moreno, A., Gutiérrez, E. y Pérez Moreno, J. C.
2008 "Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogrametría, electromiografía y dinamometría". *Revista Ingeniería Biomédica*. Vol. 2. Nº 3, pp. 16-26. Recuperado el 8 de julio de 2012. <http://revistabme.eia.edu.co/numeros/3/art/16-26.pdf>