

Diseño y Construcción de un Exoesqueleto para Rehabilitación

Design and Construction of an Exoquissette for Rehabilitation

Jorge Gudiño-Lau^a, Israel Rosales^b, Saida Charre^b, Janeth Alcalá^b, Miguel Duran^b, Daniel Vélez-Díaz^c

Abstract:

This article introduces the mechanical design and construction of an exoskeleton, for application in the area of medicine, specifically for the rehabilitation and diagnosis of lower extremity of children patients. In addition, it presents the anatomical planes of the human body and the orthopedic exoskeleton, as well as its anthropometric measurements. In the co-simulation the static and dynamic of the orthopedic exoskeleton is shown, where the strength to which it is subjected is described to see its maximum value, as well as the experimental tests performed on the exoskeleton mounted on a child.

Keywords:

Exoskeletons, diagnosis and rehabilitation

Resumen:

Este artículo introduce el diseño mecánico y la construcción de un exoesqueleto, para su aplicación en el área de la medicina, específicamente para la rehabilitación y diagnóstico de extremidad inferior de pacientes niños. Además, se presenta los planos anatómicos del cuerpo humano y el exoesqueleto ortopédico, así como sus medidas antropométricas. En la co-simulación se muestra la estática y dinámica del exoesqueleto ortopédico, donde se describe la fuerza a la que es sometido para ver su máximo valor, así como las pruebas experimentales que se realizan al exoesqueleto montado sobre un niño.

Palabras Clave:

Exoesqueletos, diagnóstico y rehabilitación

Introducción

En el mundo se han desarrollado varios prototipos de exoesqueletos de la extremidad inferior para personas con fines de rehabilitación. Realizan la rehabilitación mediante el apoyo de actuadores y control con el fin de realizar ciertas tareas deseadas, tales como proveer al usuario fuerza suficiente o cierto apoyo al momento de caminar y así mejorar su sistema neuromusculoesquelético. Las principales contribuciones en este campo son, en Banala en 2007, se diseña y construye un exoesqueleto para la rehabilitación del paso de pacientes con discapacidad al momento de caminar. El exoesqueleto es denominado ALEX (Active Leg Exoskeleton). Una imagen del exoesqueleto se muestra en la Figura 1, con las siguientes indicaciones: A: aguilón para soportar el peso del motor en la cadera, B: actuador

lineal de la cadera, C: Malacate con resorte cargado para soportar el peso del dispositivo, D: andador para soportar el peso del dispositivo, E: la rueda de andar, F: articulación de la cadera, G: célula de carga en el actuador lineal en la cadera, H: actuador lineal de la rodilla, I: articulación de la rodilla J: célula de carga en el actuador lineal de la rodilla [1].

^a Autor de Correspondencia, Universidad de Colima, Facultad e Ingeniería Electromecánica, Email: jglau@uacol.mx

^b Profesor Investigador, Universidad de Colima, Facultad e Ingeniería Electromecánica. Janeth Alcalá janethcalaca@uacol.mx; Saida Charre scharre@uacol.mx ; Israel Rosales irosales@uacol.mx ; Miguel Duran mduran@uacol.mx

^c Profesor Investigador, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Tlahuelilpan. daniel@uaeh.edu.mx

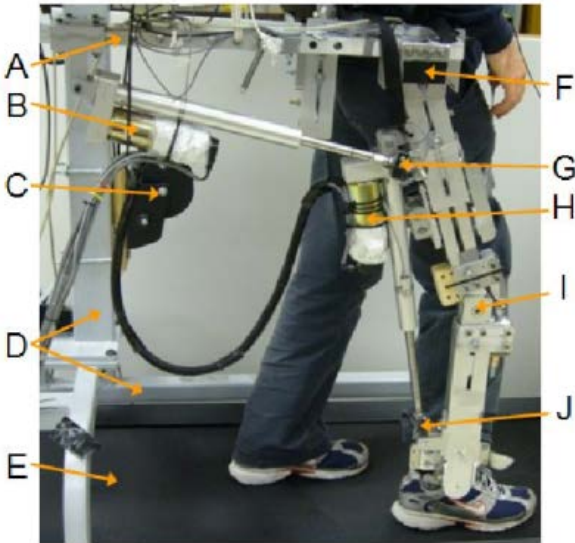


Figura 1. Exoesqueleto Alex

En Sawicki en 2009 construyeron una órtesis distinta para la pierna izquierda de tres individuos. La órtesis de rodilla-tobillo-pie (KAFO knee-ankle-foot orthosis por sus siglas en inglés) es de peso ligero, consiste de una sección de pie de polipropileno, una sección de espinilla de fibra de carbón y una sección de muslo de fibra de carbón. Tiene seis músculos neumáticos artificiales, y el aire se suministra mediante tubos de nylon mediante reguladores de presión proporcional [2]. El prototipo de la órtesis se muestra en la Figura 2.

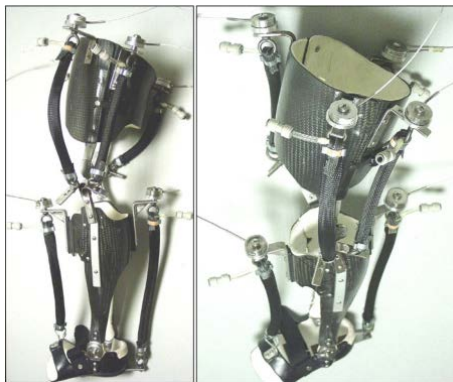


Figura 2. El prototipo de la órtesis rodilla-tobillo-pie (KAFO)

En 2010, Ashrafioun desarrolla un exoesqueleto ajustable y es diseñado para ayudar a ejercitar las piernas de varios tamaños y pesos [3]. Este exoesqueleto es actuado por tres motores de CD en la cadera, rodilla y tobillo. Un control de lazo cerrado es usado mediante un sistema de control de motores, fuentes y computadora. La estructura está hecha de aluminio con un sistema que permite la

fácil adición y remoción de motores. El exoesqueleto demuestra que es adaptable a las fuerzas externas mostrando que es adecuado para usar con pacientes actuales. El exoesqueleto junto con el maniquí se muestra en la Figura 3.

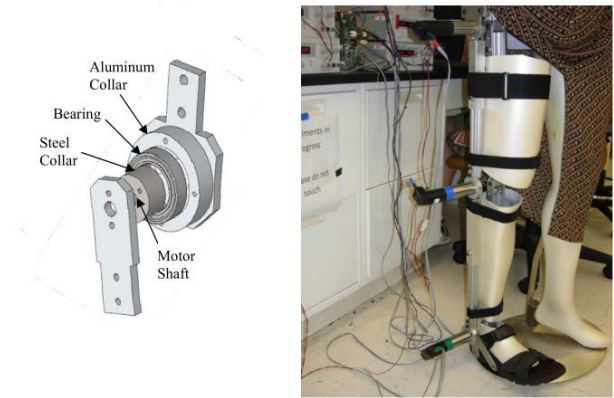


Figura 3. A la izquierda: el diseño de la articulación y el motor del exoesqueleto. A la derecha: el exoesqueleto con la pierna derecha de un maniquí articulado

En Panich en 2012 [4], se diseña y simula un exoesqueleto con fines de rehabilitación. El sistema está diseñado para sostener una pierna humana con cinturones integrados con motores en CD. El exoesqueleto tiene seis grados de libertad, y cada articulación del exoesqueleto es motorizado por un motor de CD mediante el eje del motor. La estructura está hecha de aleación de aluminio. En la Figura 4 se muestra un dibujo en CAD del diseño del exoesqueleto.



Figura 4. Modelo CAD del exoesqueleto

En Ricardo 2014 [5], se diseña un exoesqueleto capaz de soportar el peso de una persona de 75kg. La carcasa es de polipropileno con barras de duraluminio lateral y

medial y articulación de rodilla libre. El aparato mide 83 cm de largo, 47 cm de largo en el muslo y 36cm de largo en la espinilla. Está instrumentado con actuadores tipo SEA (Actuador Serie Elastico). La transmisión mecánica consiste en un arreglo de transmisión por husillo de bolas. Se diseñaron dos actuadores para acoplarse a la rodilla y el tobillo. En la Figura 5 muestra una imagen del prototipo experimental del exoesqueleto.

En Beil 2015, se desarrolla un exoesqueleto llamado KIT-EXO-1. La estructura del exoesqueleto consiste en tres partes básicas de aluminio para el muslo, espinilla y pie. Tiene tres grados de libertad y puede sostener 75kg de peso. Las articulaciones de las partes del muslo, espinilla y pie son conectadas por articulaciones ortopédicos y utilizan actuadores series lineal elásticos y no elásticos. El actuador serie lineal se usa en la articulación de la rodilla mientras que una versión no elástica se usa en la articulación del tobillo. En la Figura 6 se muestra una imagen del diseño CAD y el prototipo construido del exoesqueleto [6].



Figura 5. Prototipo experimental del exoesqueleto



Figura 6. A la izquierda modelo CAD del exoesqueleto. A la derecha prototipo

En Souit en 2016, se diseña un exoesqueleto para la investigación experimental en el control de paso de las personas. El exoesqueleto consiste principalmente en órtesis comerciales adaptados de la cadera, muslo, espinilla y pie. El exoesqueleto tiene tres grados de libertad, en la cual dos son actuados (rodilla y tobillo) y el otro es pasivo (cadera). Tiene una célula de carga la cual consiste en una estructura elástica. En la Figura 7 se muestra una imagen del modelo 3D del exoesqueleto y la imagen de un prototipo del exoesqueleto [7].

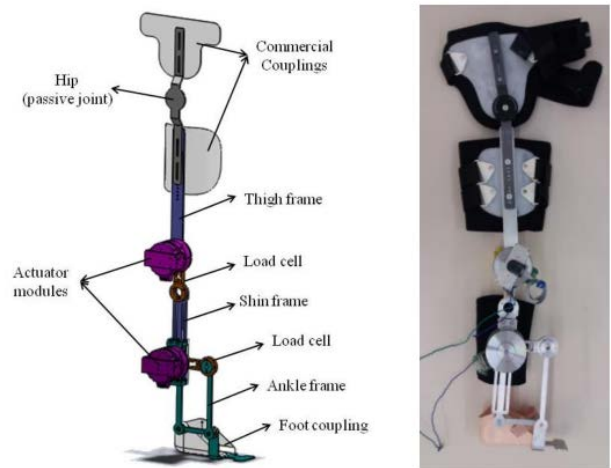


Figura 7. A la derecha modelo 3D. A la derecha prototipo del exoesqueleto.

Planteamiento del problema o Exposición del caso

Los niños pueden tener discapacidad en su extremidad inferior ya sea desde nacimiento, por accidentes o degeneraciones en su sistema neuronal. La rehabilitación de la extremidad inferior de los niños es un proceso que involucra la intervención directa de una o varias personas en asistirlos a realizar ejercicios de rehabilitación. Es necesario diseñar el exoesqueleto para niños con discapacidad en su extremidad inferior, porque apoya a la rehabilitación de la extremidad inferior en los niños sin la intervención directa de un terapeuta.

El exoesqueleto debe ser diseñado en SolidWorks® y co-simulado junto con Matlab® para comprobar que el exoesqueleto es adecuado para las tareas que se requieran en la rehabilitación de la extremidad inferior en los niños.

El exoesqueleto también es dimensionado a las medidas que tienen los niños, ser atractivo en su uso, no tener un peso que excesivo y además poder soportar la carga del niño que lo utilice.

Conocimiento Previo

En esta sección se muestran algunos conceptos básicos relacionados con generalidades anatómicas y terminología del movimiento de la extremidad inferior humana.

Planos anatómicos.

Desde un punto de vista médico, el cuerpo humano se divide en varias regiones (cabeza, cuello, torso, brazos, abdomen, extremidad superior, extremidad inferior) y existen planos anatómicos que describen tres secciones en ella, como se muestra en la Figura 8. Una descripción de las regiones se muestra a continuación [8].

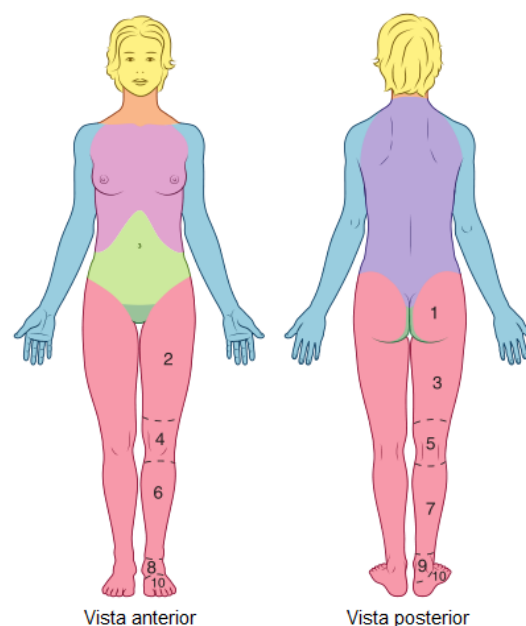


Figura 8. Cuerpo humano dividido en varias regiones anatómicas.

Las descripciones anatómicas son mostradas en la Figura 9 y están basados en cuatro planos imaginarios que se cruzan en el cuerpo, el cuál debe estar colocado en la llamada posición anatómica. Los planos sagitales, frontales y transversales pueden ser más de uno, pero solo existe un plano medial.

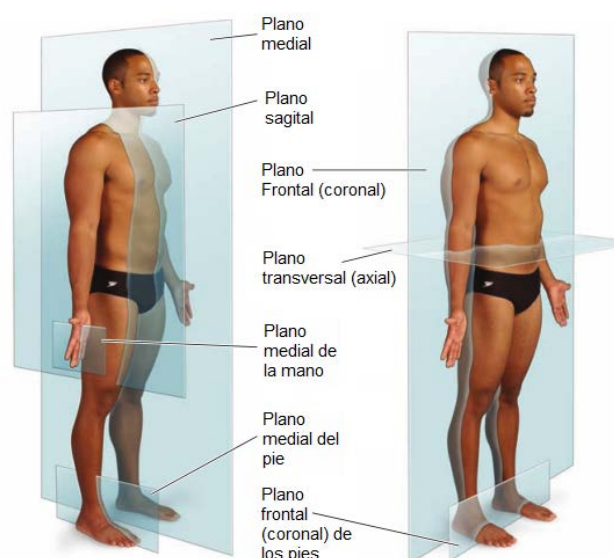


Figura 9. Planos anatómicos del cuerpo humano

Algunos conceptos básicos de las descripciones anatómicas son:

- ✓ Plano medial (medial sagital): es el plano vertical que pasa longitudinalmente a través del centro del cuerpo, separando una parte derecha, y separando otra parte izquierda.
- ✓ Planos sagitales: son los planos verticales atravesando el cuerpo que se encuentran paralelos al plano medial. Sirven para dar un punto de referencia al indicar la posición de un plano en particular.
- ✓ Planos frontales (coronales): son planos verticales pasando a través del cuerpo en ángulos perpendiculares al plano medial, dividiéndolo en porciones anteriores (frente) y posteriores (espalda)
- ✓ Planos transversales: son los planos que pasan a través de los cuerpos en ángulos perpendiculares a los planos mediales y frontales. El plano transversal divide el cuerpo en una parte superior y una parte inferior.

Se utilizan adjetivos (usualmente arreglados en pares de opuestos) que describen la posición anatómica del cuerpo. El dorso se refiere a la parte superior o dorsal (atrás) de cualquier parte del cuerpo que brota anteriormente del cuerpo, tales como el dorso del pie, mano o lengua. La planta indica la parte inferior o baja del pie, la cual está en contacto con el suelo cuando se está parado descalzo, como se observa en la Figura 10.



Figura 10. Superficie plantar contra la superficie dorsal (del pie)

Terminología del movimiento.

Los movimientos del cuerpo que ocurren en las articulaciones del cuerpo son descritos en relación a los ejes y planos donde ocurre el movimiento del cuerpo. En la Figura 11 se muestran los movimientos que ocurren en la extremidad inferior. En a) se muestra la flexión y extensión de la extremidad inferior en la articulación de la cadera, en b) se observa la flexión y extensión de la pierna en la articulación de la rodilla, en c) se muestra la dorsiflexión y plantar flexión del pie en la extremidad del tobillo, en d) se muestra la inversión y eversión del pie en las articulaciones subtalar y transversal del tarso, e) circunducción (movimiento circular) de la extremidad inferior en la articulación de la cadera, y f) abducción y aducción de la extremidad inferior derecha y rotación de la extremidad inferior izquierda en la articulación de la cadera.

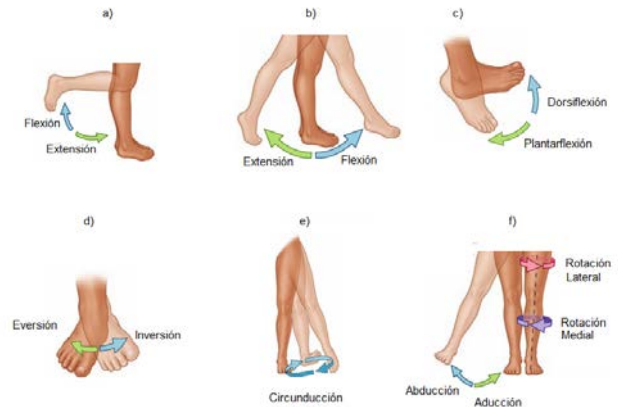


Figura 12. Movimientos de la extremidad inferior

Paso humano.

El paso humano puede ser definido como un proceso cíclico que está compuesto por una fase de apoyo y una fase de oscilación como se muestra en la Figura 13. Este proceso es descrito mecánicamente por variables cinemáticas y cinéticas en las articulaciones de la extremidad inferior humano. También se consideran parámetros tales como longitud del paso, longitud del, cadencia y velocidad [9].

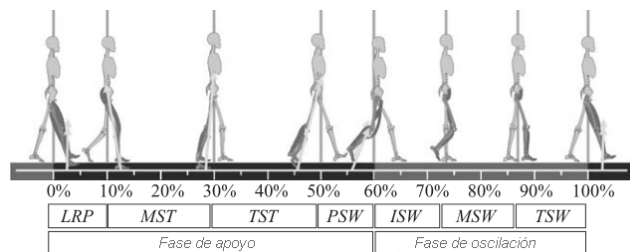


Figura 13. Periodos y fases en la marcha humana

La fase de apoyo constituye 60% del ciclo y se divide en los siguientes cuatro periodos: respuesta de carga (LRP), periodo medio de apoyo (MST), periodo final de apoyo (TST) y pre-oscilación (PSW). La fase de oscilación constituye el 40% restante y está dividido en tres periodos: periodo inicial de oscilación (ISW), periodo medio de oscilación (MSW) y periodo final de oscilación (TSW). El inicio y fin de cada periodo está definida por ciertos eventos específicos.

La fase de apoyo inicia con el periodo de respuesta de carga (LRP). Este periodo inicia cuando el pie hace contacto con el suelo. Este periodo corresponde al primer periodo de soporte por las dos extremidades inferiores y termina cuando la punta del pie contra-lateral empieza a despegar del suelo.

Después inicia el periodo medio de apoyo (MST), que consiste en el despegue de la punta del pie del suelo y termina cuando el centro de gravedad está por encima del pie de apoyo. El siguiente periodo es el periodo final de apoyo (TST) e inicia cuando el centro de gravedad está sobre el pie de apoyo y termina cuando el pie contra-lateral hace contacto con el suelo. Aproximadamente al 35%, durante el periodo final de apoyo, el talón eleva del suelo.

El periodo de pre-oscilación (PSW) inicia con cuando la extremidad contra-lateral hace contacto con el suelo, soportando nuevamente el cuerpo con las dos extremidades inferiores y termina cuando la punta del pie posterior despegando del suelo. La fase de oscilación inicia con el periodo inicial de oscilación (ISW), inicia con el despegue de la punta del pie posterior y continuo hasta la flexión máxima de la rodilla (de 40 ° a 60 °). Después, el periodo medio de oscilación (MSW) abarca desde la flexión máxima de la rodilla hasta que la tibia está vertical o perpendicular al suelo. Al final, el periodo final de oscilación (TSW) inicia cuando la tibia está en posición vertical con respecto al suelo y termina con el contacto inicial del tobillo con el suelo.

Exoesqueleto mecánico.

Es una estructura rígida, de configuración antropomórfica, que va sobrepuesto en el cuerpo de un humano, usualmente con la finalidad de proveer una extensión a las funciones básicas de las extremidades del cuerpo del usuario. Los hay tantos pasivos como activos. Los exoesqueletos pasivos son aquellos que tienen su movilidad generada por la misma fuerza generada por el usuario o por medio de mecanismos como lo son resortes y levas, mientras que los exoesqueletos activos pueden tener sus movimientos generados por medio de actuadores neumáticos, eléctricos, mecánicos, o una combinación de estas. Los exoesqueletos mecánicos

usualmente tienen sensores aplicados en ellas con la finalidad de poder implementar un control en ellas y así obtener un cierto movimiento deseado [10].

Órtesis

Es un aparato externo aplicado al cuerpo humano con la finalidad de mejorar las condiciones neuromusculoesqueléticas del cuerpo humano [11].

En este trabajo se refiere al dispositivo a construir como un exoesqueleto ortopédico, que puede ser definido como un exoesqueleto mecánico que tiene como propósito mejorar o modificar las condiciones estructurales, musculares y neuronales del individuo al que va aplicado. Este exoesqueleto y el control que llevará aplicado en ella tienen como finalidad la rehabilitación del usuario.

El trabajo de rehabilitación en la extremidad inferior consiste en restaurar (o la implementación) del movimiento descrito anterior sobre la marcha humana en los pacientes que sufren de incapacidad en su propia marcha, o sí el exoesqueleto lo permite, algún otro movimiento destinada a otra tarea rehabilitaría.

Diseño y Co-Simulación

En esta sección se muestra el prototipo del exoesqueleto realizado en el software de SolidWorks®, para realizar el análisis cinemático y dinámico.

Diseño

El exoesqueleto ortopédico de la extremidad inferior tiene como su aplicación principal la implementación de una marcha humana normal en niños con discapacidad en sus extremidades inferiores, y en otros casos podría ser utilizado para rehabilitar una articulación en particular siempre que este lo permita. El exoesqueleto debe ser capaz de soportar la carga de un niño, su propio peso, y al mismo tiempo realizar las tareas deseadas, que es asistir al usuario a replicar el ciclo de marcha humana normal en su propia marcha o alguna otra tarea en específico relacionado con la rehabilitación de la extremidad inferior humana.

Considerando lo anterior, el exoesqueleto ortopédico de la extremidad inferior debe ser actuado en sus articulaciones. En este trabajo, se diseña un exoesqueleto activo que tiene un DOF (degrees of freedom, grados de libertad por sus siglas en ingles) que acompañan las siguientes posiciones de la extremidad inferior del cuerpo humano: la cadera, la rodilla, y el tobillo.

El exoesqueleto debe ser ligero, se debe minimizar los costos energéticos y debe ser capaz de permitir los movimientos necesarios para la rehabilitación. Con la finalidad de obtener una estructura rígida y ligera, el

material de los eslabones del exoesqueleto es de aluminio (6061-T6). También deben considerarse el peso de los actuadores y la fuente de alimentación de estas. Para poder realizar las tareas deseadas, la estructura del exoesqueleto tiene un soporte de cadera, que es conectado a un eslabón de la pierna, que a su vez va conectado a un eslabón de la espinilla, y este a un eslabón del tobillo, en donde cada par tiene un mecanismo de revoluta con el fin de producir los movimientos deseados.

Las dimensiones del exoesqueleto ortopédico son dimensionadas a base de un estudio antropométrico sobre la población de niños de ambos sexos, de 6 a 8 años de edad, de la ciudad de Guadalajara [12]. Los datos se muestran en la Tabla 2 y la Figura 14 muestra la sección donde se encuentra la medida antropométrica.

La antropometría es una ciencia que estudia las medidas y dimensiones de las diferentes partes del cuerpo humano ya que estas varían de un individuo para otro según su edad, sexo, raza, nivel socioeconómico, etc. Un ejemplo de antropometría es mostrado en la Figura 14.

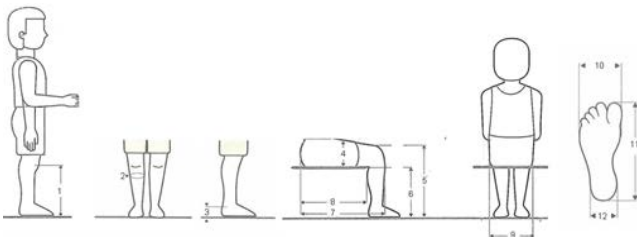


Figura 14. Medidas antropométricas respectivas de la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las medidas antropométricas en los niños

| | Dimensión (mm) | | | | | |
|----------------------------|----------------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | Masculino | | | Femenino | | |
| Edad | 6 años | 7 años | 8 años | 6 años | 7 años | 8 años |
| 1. Peso (kg) | 22.8 | 25.8 | 29.3 | 22.4 | 25.1 | 28.4 |
| 2. Altura rodilla | 330 | 335 | 354 | 320 | 334 | 354 |
| 3. Perímetro pantorrilla | 236 | 247 | 259 | 236 | 246 | 256 |
| 4. Altura tobillo | 57 | 58 | 59 | 56 | 57 | 59 |
| 5. Altura máx muslo | 97 | 102 | 108 | 99 | 104 | 110 |
| 6. Altura rodilla sentado | 359 | 370 | 389 | 350 | 370 | 389 |
| 7. Altura poplitea | 296 | 312 | 328 | 298 | 312 | 329 |
| 8. Longitud nalga-rodilla | 384 | 409 | 429 | 385 | 411 | 433 |
| 9. Longitud nalga-poplitea | 314 | 335 | 352 | 324 | 339 | 359 |
| 10. Anchura cadera sentado | 230 | 249 | 252 | 235 | 245 | 259 |
| 11. Anchura del pie | 74 | 75 | 79 | 72 | 74 | 77 |
| 12. Longitud del pie | 185 | 193 | 203 | 172 | 190 | 200 |
| 13. Anchura talón | 52 | 54 | 56 | 51 | 52 | 53 |

Se tiene un modelo CAD del exoesqueleto ortopédico en SolidWorks mostrado en la Figura 15, se realiza un análisis estático y es exportado a Matlab para observar que cumpla con los requisitos cinemáticos mediante el uso de SimMechanics.

SimMechanics es una aplicación desarrollada para Matlab, que sirve para modelar y simular sistemas mecánicos multi-cuerpos y se representa con diagrama de bloques los cuerpos, las articulaciones, las

restricciones, los elementos de fuerza que intervienen en el sistema, como se observa en la Figura 16.



Figura 15. Diseño CAD del exoesqueleto ortopédico de la extremidad inferior.

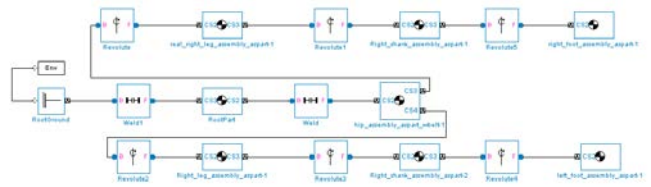


Figura 16. Diagrama de bloques del exoesqueleto en SimMechanics

Co-simulación

La co-simulación es una metodología aplicada a la simulación, que permite a componentes individuales ser simulados con diferentes herramientas ejecutándose al mismo tiempo e intercambiando información de forma colaborativa esto implica la interacción de dos sistemas distintos.

En este caso, la co-simulación se lleva a cabo utilizando la herramienta de diseño CAD conocido como SolidWorks, donde se aprovecha su motor de diseño para generar distintos componentes mecánicos y sus propiedades, donde los componentes generados son exportados al entorno de Matlab Simulink mediante el uso de los complementos de SimMechanics, lo que permite implementar un control a los componentes exportados usando el entorno de Matlab.

En la Figura 16, se muestra el modelo en SinMechanics de Matlab del exoesqueleto ortopédico de la Figura 15. Ejecutando el programa sin ninguna modificación muestra una simulación del exoesqueleto, donde todos los mecanismos están siendo actuados, generando un movimiento en los eslabones del exoesqueleto. Observar en la Figura 17 los centros de gravedad de cada eslabón, lo que permite realizar un análisis cinemático del exoesqueleto.

SimMechanics crea automáticamente las animaciones en 3D que permiten visualizar la dinámica del sistema, como se observa en la Figura 17.

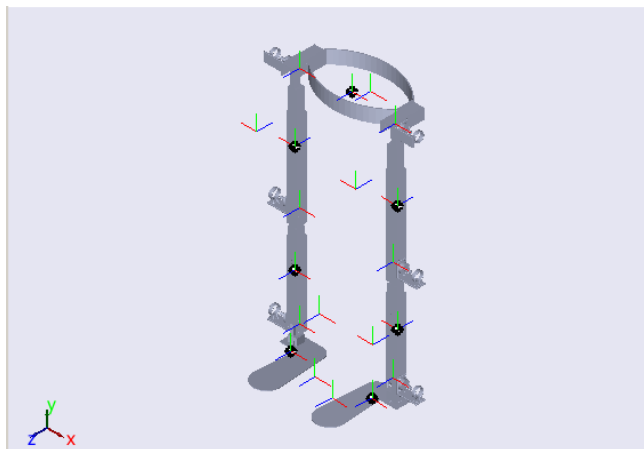


Figura 17. Simulación del exoesqueleto en SimMechanics

Resultados Experimentales

Para probar que el exoesqueleto ortopédico es construido correctamente, se realiza pruebas experimentales en niños, para verificar el buen funcionamiento del prototipo y la ergonomía.

El exoesqueleto ortopédico de la extremidad inferior fue probado en un niño de 6 años sin ningún tipo de actuador activo. El exoesqueleto se prueba con el usuario caminando. Se obtuvieron movimientos de extensión-flexión de la rodilla, extensión-flexión de la pierna, plantarflexión y dorsiflexión del pie. Esta prueba se hizo para contemplar si el exoesqueleto puede soportar el peso predicho y si todos los puntos están funcionando correctamente. En la Figura 18 se muestra el primer experimento, que consiste en mostrar la estructura del exoesqueleto y el acoplamiento al cuerpo humano (niño).



Figura 18. Exoesqueleto puesto sobre un niño

En las pruebas de extensión-flexión de la rodilla se realizan ejercicios nombrados flexión y extensión partiendo el plano sagital (este es el plano perpendicular al suelo que corta al cuerpo en la mitad derecha y mitad izquierda y/o parte alta y parte baja), se observa que el exoesqueleto soporta todo lo previsto. Y no hay ningún inconveniente para la movilización del cuerpo humano las pruebas son satisfactorias. En la Figura 19 se muestra la extensión donde aumenta el ángulo entre estos dos extremos.



Figura 19. Extensión de la rodilla

Los ejercicios de flexión son consecuencias de disminuir el ángulo y aproximar los extremos que son la pantorrilla y muslo; como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Flexión de la rodilla

Las Figura 21 y 22 se muestran los ejercicios de extensión-flexión de la pierna, se hizo sentadilla flexionando la rodilla solo 45 grados, ya que este ejercicio es muy intenso para cuádriceps y rodillas; como se observa el exoesqueleto funciona correctamente.



Figura 21. Flexión de la pierna



Figura 22. Extensión de la pierna

Plantarflexión o Flexión plantar es mostrada en la Figura 23, la prueba consiste en el movimiento en la articulación del tobillo que aleja los pies de la pierna, o el movimiento de los dedos hacia la planta del pie. El plantar es la parte inferior del pie, la planta. Flexión plantar es el movimiento del pie alejándose del cuerpo, cuando aumentan o los 90 grados.



Figura 23. Plantarflexión del pie

Dorsiflexión o flexión dorsal es el movimiento que reduce el ángulo entre el pie y la pierna (90 grados), en el cual los dedos del pie se acercan a la espinilla, como se

observa en la Figura 24. La prueba de la dorsiflexión fue realizada sin contratiempo.



Figura 24. Dorsiflexión del pie

Conclusiones

En este artículo se muestra el desarrollo de este prototipo, se utiliza la metodología de la co-simulación (diseño 3D) para diseñar un exoesqueleto personalizado. Esto se logra gracias al estudio antropométrico para la definición de variables de este tipo poblacional, tales como dimensiones morfológicas, edad, sexo, raza, etc. También se utilizan herramientas CAD, SimMechanics/Matlab que ayudan a analizar los distintos tipos de opciones (riesgos, máximo nivel de soporte, resistencia de cada material al uso prolongado y con peso excesivo). Este trabajo se realiza en simulación, y también se hacen pruebas experimentales con un niño que sobrepasaba un poco con los niveles aptos para este prototipo. Pero este modelo fue satisfactorio para la conformación del mecanismo y del usuario. Por lo que se concluye, que el mecanismo funciona correctamente y se espera como trabajo futuro, continuar con la parte de electrónica y control.

Referencias

- [1] S. K. Banala, S. K. Agrawal, and J. P. Scholz, "Active Leg Exoskeleton (ALEX) for Gait Rehabilitation of Motor-Impaired Patients". 2007.
- [2] G. S. Sawicki and D. P. Ferris, "A pneumatically powered knee-ankle-foot orthosis (KAFO) with myoelectric activation and inhibition.," J. Neuroeng. Rehabil., vol. 6, p. 23, 2009.
- [3] H. Ashrafioun, K. Grosh, K. J. Burke, and K. Bommer, "An Intelligent Exoskeleton for Lower Limb Rehabilitation," Vol. 2 34th Annu. Mech. Robot. Conf. Parts A B, no. January, pp. 3-9, 2010.
- [4] S. Panich, "Design and Simulation of Leg-Exoskeleton Suit for Rehabilitation," Glob. J. Med. Res., vol. 12, no. 3, 2012.
- [5] R. López, H. Aguilar, S. Salazar, R. Lozano and J. Torres, "Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, vol. 11, no. 3, pp. 304-314, 2014.
- [6] J. Beil, G. Perner, and T. Asfour, "Design and control of the lower limb exoskeleton KIT-EXO-1," 2015 IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot., pp. 119-124, 2015.

- [7] C. Souit, D. Santana Coelho, M. Szylił, F. Camargo-Junior, M. Peres Cortez Junior, and A. Forner-Cordero, "Design of a lower limb exoskeleton for experimental research on gait control," in Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2016, vol. 2016–July, pp. 1098–1103.
- [8] Moore, Keith L, Anne M.R. Agus, dan Arthur F. Dalley, Moore Essential Clinical Anatomy, vol. 53, no. 9. 2013.
- [9] J. Pons, Wearable robots, 1st ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008, pp. 105-107.
- [10] C. Fleischer, "Controlling Exoskeletons with EMG signals and a Biomechanical Body Model," p. 161, 2007.
- [11] Prosthetics and orthotics -- Vocabulary -- Part 1: General terms for external limb prostheses and external orthoses, ISO Standard 8549-1:1989
- [12] L. Prado-León, R. Avila-Chaurand and E. González-Muñoz, "Anthropometric study of Mexican primary school children", Applied Ergonomics, vol. 32, no. 4, pp. 339-345, 2001.