

Generador de patrones de marcha tridimensionales dependientes de la altura y la velocidad

Romero-Sorozábal, Pablo.^{a,*}, Delgado-Oleas, Gabriel^a, Gutierrez, Álvaro.^b, Rocon, Eduardo.^a

^a Centro de Automática y Robótica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas–Universidad Politécnica de Madrid (CSIC-UPM), España, p.romero@csic.es

^b ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

To cite this article: Romero-Sorozábal, P., Delgado-Oleas, Gabriel, Gutierrez, A., Rocon, E. 2023. Height-Speed dependent three-dimensional gait generator XLIV Jornadas de Automática, 105-109. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.105>

Resumen

En el campo de la rehabilitación robótica de la marcha, a menudo es necesario controlar los dispositivos robóticos para que sigan trayectorias de referencia específicas similares a las humanas. En los últimos años, se han propuesto varios modelos de generadores de marcha que proporcionan patrones de marcha personalizados ajustables a una serie de alturas y velocidades de marcha. Estos trabajos se desarrollaron centrándose principalmente en dispositivos de rehabilitación de la marcha que controlan las trayectorias angulares de las articulaciones inferiores. Otros dispositivos de rehabilitación similares, como los robots de rehabilitación con efector final que controlan las trayectorias de posición y orientación de sus articulaciones en el espacio cartesiano, no pueden implementarlos fácilmente. En este artículo se propone un nuevo generador de patrones de marcha que genera trayectorias tridimensionales individualizadas para robots de rehabilitación de la marcha. El modelo utiliza predicciones de las trayectorias angulares de las articulaciones, basadas en modelos de regresión multivariable, proporciones antropométricas humanas y modulaciones espaciotemporales para predecir las trayectorias cartesianas de las articulaciones inferiores de la pelvis, la cadera, la rodilla y el tobillo durante la marcha. Las trayectorias reconstruidas se compararon con la cinemática medida de un conjunto de datos de la marcha con 42 participantes que caminaban a 8 velocidades diferentes cada uno. Las trayectorias generadas coincidieron con las medidas con un error medio RMSE de 15,27 mm y coeficiente de correlación R medio de 89% para todos los ejes articulares, lo que sugiere que se trata de una buena solución para su aplicación en dispositivos robóticos de rehabilitación de la marcha con efector final.

Palabras clave: cinemática de la marcha, regresiones, métodos de predicción, rehabilitación robótica.

Height-Speed dependent three-dimensional gait generator

Abstract

In the robotic gait rehabilitation field, it is often required to control the robotic devices to follow specific human-like reference trajectories. In the recent years, various gait generator models have been proposed, providing customized gait patterns adjustable to a range of heights and gait speeds. These works were developed focusing mainly on gait rehabilitation devices that control the angular trajectories of the lower joints. Similar rehabilitation devices, such as end-effector rehabilitation robots that control their joint position and orientation trajectories in the Cartesian space cannot easily implement them. In this article, it is proposed a new gait pattern generator that outputs individualized three-dimensional joints' trajectories for gait rehabilitation robots. The algorithm uses joint's angular trajectories predictions, based on multi-variable regressions-models, human anthropometric proportions and spatiotemporal modulations to predict the cartesian lower joints trajectories of the pelvis, hip, knee and ankle

*Autor para correspondencia: pablo.romero@csic.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

during gait. The reconstructed trajectories were compared to the measured joint kinematics of a gait dataset with 42 participants walking at 8 different velocities each. The predicted trajectories matched the measured ones with an RMSE average error of 15.27mm and mean R coefficient of 89% for all the joints axis, suggesting to be a good solution to be applied in end-effector gait robotic rehabilitation devices.

Keywords: robotic gait support, regressions, prediction methods, rehabilitation robotics.

1. Introducción

En la última década se han producido avances significativos en el campo de la robótica de rehabilitación (Hobbs and Artemiadis 2020). Se han desarrollado muchos dispositivos desde distintas perspectivas de la rehabilitación, que pueden clasificarse como exoesqueletos o robots efectores finales (Molteni et al. 2018). Los exoesqueletos son dispositivos de rehabilitación vestibles diseñados para controlar las posiciones angulares, velocidades y/o pares de las articulaciones del usuario (Molteni et al. 2018). Mientras que los robots de rehabilitación con efectores terminales son dispositivos no morfológicos que controlan las posiciones, velocidades, pares y/u orientaciones de sus efectores terminales fijados a las articulaciones del usuario (Molteni et al. 2018).

Cuando se utilizan con fines de rehabilitación de la marcha, suelen controlar las articulaciones del usuario para que sigan trayectorias lo más parecidas posibles a los perfiles naturales de la marcha (Vallery et al. 2009). Algunos de los enfoques más tradicionales para obtener estas trayectorias eran: mediciones de patrones de marcha clínicamente preplanificados o mediciones de trayectorias angulares de las articulaciones de los usuarios dentro de los dispositivos robóticos en control transparente (Vallery et al. 2009). Sin embargo, la marcha es una secuencia compleja de movimientos coordinados en los que intervienen varios músculos y articulaciones (Banala et al. 2009). Estos movimientos son patrones casi periódicos con una gran variabilidad que depende de diversos factores físicos, como la altura o la velocidad de la marcha (Samson et al. 2014). Para obtener una buena interacción hombre-máquina durante las terapias robóticas de la marcha y mejorar los resultados de la rehabilitación, el control de las trayectorias articulares de los pacientes debe incluir esta variabilidad (Berger et al. 2019).

Enfoques recientes han resuelto este problema proponiendo generadores de patrones angulares de marcha basados en modelos de regresión aplicados sobre conjuntos de datos de marcha multi-sujeto y multi-velocidad (Hu et al. 2020; Koopman, van Asseldonk, and Van der Kooij 2014). Las trayectorias predichas obtenidas se ajustaban bien a las medidas, mejorando el acoplamiento usuario-máquina durante las rehabilitaciones de la marcha con exoesqueletos (Hu et al. 2020).

Estos generadores de marcha ya se han aplicado en algunos exoesqueletos robóticos de rehabilitación de la marcha (Lora-Millan et al. 2022). Sin embargo, algunos robots efectores finales no pueden utilizar directamente este enfoque, ya que su control está diseñado para controlar las posiciones de las articulaciones 3D de los pacientes en el espacio euclidiano.

En este artículo, presentamos un generador de patrones de marcha tridimensional adaptable a la altura y velocidad de marcha de los usuarios para controlar el movimiento 3D de las

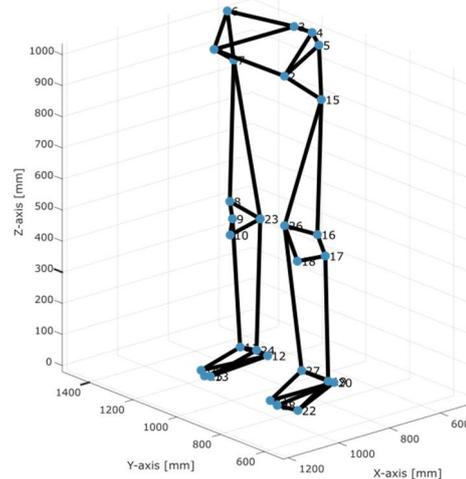


Figura 1. Disposición de los marcadores utilizados en el estudio. Mediante un sistema de fotogrametría se registran las trayectorias articulares durante la marcha.

extremidades inferiores. El generador utiliza modelos de regresión multivariable para predecir los puntos clave de las trayectorias de las articulaciones tridimensionales específicas para diferentes alturas y velocidades de la marcha con el fin de reconstruir los perfiles de la marcha de las articulaciones aplicando un ajuste de spline cuántico por piezas.

2. Generador de patrones

2.1. Métodos

2.1.1. Recopilación de Datos

Se utilizó un conjunto de datos públicos de 42 participantes saludables, todos caminando a 8 velocidades diferentes (Fukuchi, Fukuchi, and Duarte 2018). Esta base de datos incluye 24 adultos jóvenes (edad media 27,6 años, altura media 171,1 cm, peso medio 68,4 kg) y 18 adultos mayores (edad media 62,7 años, altura media 161,8 cm, peso medio 66,9 kg), ver Tabla 1. Los sujetos estaban libres de lesiones en las extremidades inferiores en los seis meses previos a las mediciones. La captura de los datos de marcha se realizó mediante 12 cámaras a 150 Hz y una cinta rodante instrumentada a 300 Hz. A cada participante se le adhirieron 28 marcadores y caminó durante 90 segundos a velocidades seleccionadas personalmente (40%, 55%, 70%, 85%, 100%, 115%, 130% y 145% de su velocidad de marcha adimensional, número de Froude), ver Figura 1. La información contenida en la base de datos comprende los datos en crudo sincronizados de las plataformas de presión de la cinta rodante sensorizada y de las posiciones en el espacio de los marcadores.

TABLA 1. INFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Variable	Mediana	P ₂₅	P ₇₅	Max	Min
Altura (cm)	168.2	157.5	174.2	192	147
Velocidad (km/h)	4.5	3.3	5.4	6.3	1.2
Masa (kg)	67.5	61.2	75.8	95.4	44.9

2.1.2. Análisis de los datos

La marcha humana es una compleja secuencia de movimientos coordinados. Cada individuo presenta variaciones en su perfil cinemático en función de sus condiciones físicas y velocidad de la marcha. Con el propósito de abordar esta variabilidad y personalizar los patrones de marcha para cada sujeto, hemos aplicado el método de reconstrucción de trayectorias angulares de Koopman sobre las trayectorias espaciales tridimensionales [x,y,z] de la anterior base de datos.

A partir de los datos en crudo de los marcadores obtenidos, se reconstruyeron y segmentaron las trayectorias tridimensionales [x,y,z] de las articulaciones de las caderas, rodillas y tobillos. Para agilizar la modelización de estos perfiles de marcha y reducir su complejidad, identificamos eventos clave que definiesen las trayectorias de las articulaciones. Sobre estos eventos clave se aplican estimaciones robustas de regresión que consideran la altura del sujeto y la velocidad de la marcha como variables independientes. Las estimaciones obtenidas tras las regresiones se utilizaron para reconstruir las trayectorias tridimensionales de la marcha aplicando splines.

A. Perfiles cinemáticos articulares

Las posiciones de las articulaciones registradas con el sistema de captura de movimiento se procesaron con el código de software Matlab ©. Se obtuvieron las trayectorias de las articulaciones (caderas, rodillas y tobillos) en los planos x,y y z de todos los ensayos de marcha de los sujetos (42 sujetos x 8 velocidades x 90 segundos de marcha), ver Figura 2.

En cada ensayo, las trayectorias articulares se segmentaron en ciclos de marcha, tomando como referencia el golpe de talón para marcar el inicio (0% del ciclo de marcha) y el siguiente impacto del mismo talón para señalar el final (100% del ciclo de marcha). El impacto del talón se determinó a partir del análisis de las fuerzas de reacción del suelo recogidas por la cinta rodante instrumentada sobre la que se realizaron las tomas de datos. El golpe de talón se detectó analizando los perfiles de fuerzas de reacción de la cinta durante el ensayo.

Los valores atípicos, producto de errores en las mediciones de las placas de fuerza, se detectaron comparando la duración de cada ciclo segmentado con la duración media de todos los ciclos de marcha, eliminando cualquier valor que cayera fuera del intervalo intercuartil del 25-75%.

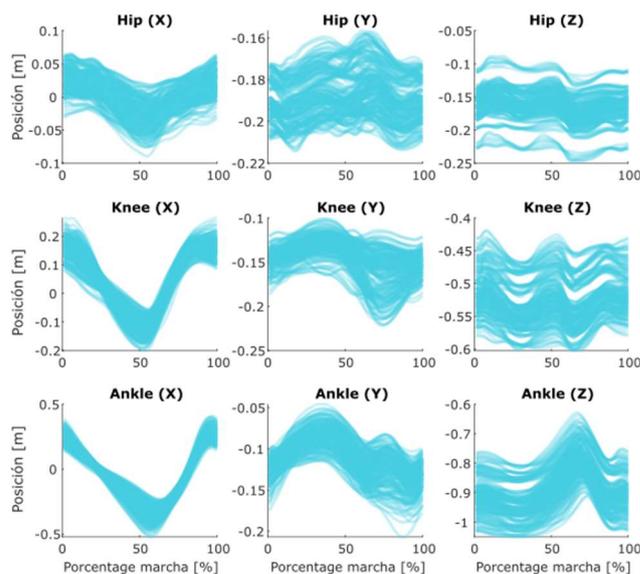


Figura 2. Representación visual de las trayectorias de todas las articulaciones en los diferentes ejes, para todos los pacientes y a todas las velocidades de marcha. Con esta visualización se muestra la variabilidad en las trayectorias.

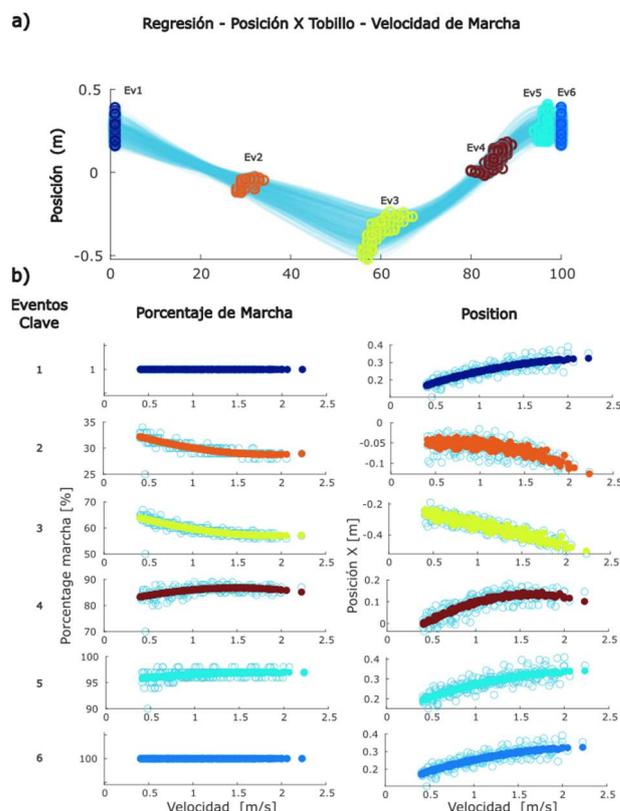


Figura 3. Esta figura proporciona una comparación entre los datos analizados y modelados de las trayectorias en el eje X del tobillo de todos los participantes en la base de datos. a) Trayectorias medidas en el durante la marcha del tobillo en el eje X junto a sus 6 eventos cinemáticos clave. b) Estimaciones mediante regresiones multivariable robustas de los eventos clave medidos (posición en el espacio y fase de la marcha) para cada participante en la base de datos.

B. Eventos clave de la marcha

Con el objetivo de desglosar las trayectorias de la marcha en puntos de datos significativos y manejables, se identifican eventos clave mediante los cuales posteriormente se pueda reconstruir la marcha. Para ello, sobre las trayectorias obtenidas anteriormente se estudiaron los puntos de máxima velocidad, aceleración y amplitud y sus correspondientes posiciones en las fases de la marcha.

Una vez identificados, por medio de un análisis estadístico se obtuvo el p-valor de cada uno de los eventos clave respecto a las variaciones de altura y velocidad para comprobar cuáles eran significativamente correlacionables con las variables independientes (altura y velocidad de la marcha), ver Figura 3 a).

C. Regresiones sobre los eventos clave de la marcha

Para estimar los parámetros característicos de la marcha según las condiciones de cada sujeto se aplicaron regresiones robustas con ponderaciones bicuadradas. Los eventos cinemáticos clave extraídos de las trayectorias articulares en nuestra base de datos se utilizan como variables dependientes. La altura y velocidad de marcha actuaron como variables independientes. Esta estrategia tiene como objetivo determinar los parámetros característicos que nos permitirán anticipar las trayectorias de las articulaciones considerando factores individuales como la altura y la velocidad de marcha, ver Figura 3 b).

D. Reconstrucción de las trayectorias

A partir de las estimaciones obtenidas de los eventos clave y sus posiciones en el ciclo de marcha se sintetizan las trayectorias uniendo estos eventos mediante interpolaciones de tipo splines, ver Figura 4.

3. Resultados

Para validar la estimación de este generador de patrones se llevó a cabo la reconstrucción de las trayectorias tridimensionales de las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo para cada sujeto y velocidad de marcha, obteniendo sus correspondientes trayectorias en los ejes [x,y,z]. Se calcularon los errores medios cuadráticos (RMSE) para cada trayectoria de cada articulación y eje, así como las correlaciones (R) entre las trayectorias predichas mediante nuestro modelo y las medidas.

Los resultados de la validación mostraron que las trayectorias reconstruidas por el generador de patrones coincidieron de manera cercana con las trayectorias reales medidas. Los valores de RMSE fueron inferiores a 3,5 cm para todas las articulaciones y ejes con un valor medio de 1.5cm. Además, los resultados del estudio de correlación mostraron unos valores siempre mayores al 70% en todas las articulaciones y ejes, con una media del 89%, ver Figura 5.

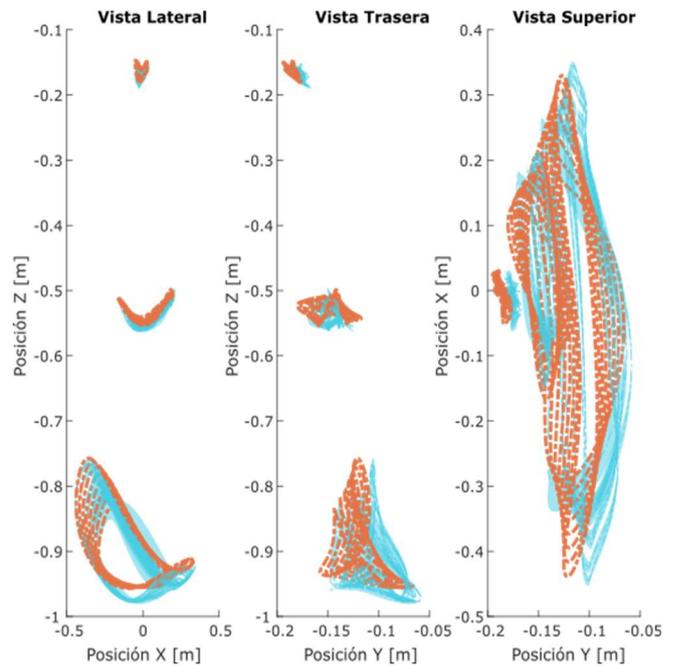


Figura 4. Visualización de las trayectorias de un sujeto (N19) a sus 8 velocidades de marcha. Las trayectorias reales medidas en azul y las reconstruidas en naranja. Como se puede apreciar la estimación de eventos cinemáticos y posterior reconstrucción se ajusta a las medidas reales se adecua a las trayectorias reales.

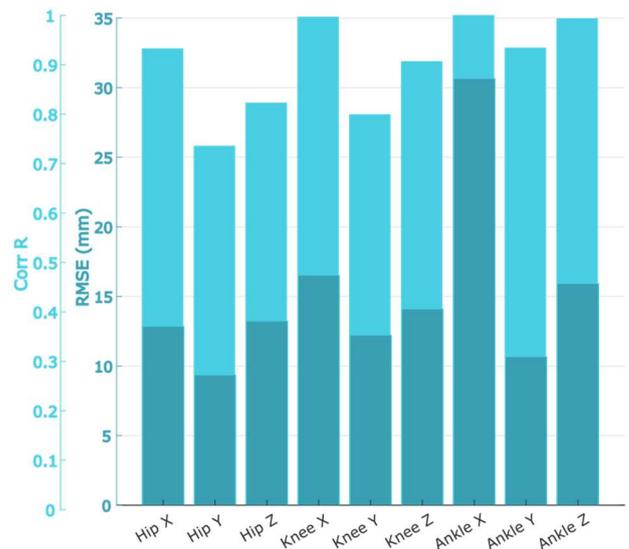


Figura 5. Presentación detallada de las métricas de rendimiento (correlaciones R y RMSE) para todos los sujetos, velocidades, articulaciones y ejes. Este despliegue de resultados proporciona una visión completa de la efectividad del modelo, ilustrando su capacidad de ajuste y predicción a través de las diferentes variables y condiciones analizadas.

4. Conclusiones

Este estudio se ha desarrollado un generador de patrones de marcha tridimensionales dependiente de la altura y la velocidad para su uso en dispositivos robóticos de rehabilitación de la marcha. Los resultados de validación demostraron una precisión alta, con errores medios cuadráticos inferiores a 3,5 cm con una media de 1.5cm y correlaciones superiores al 70% con una media del 89%. Estos hallazgos respaldan la efectividad y aplicabilidad del generador en la rehabilitación robótica, proporcionando una solución personalizada y adaptable para mejorar la calidad de los tratamientos de rehabilitación de la marcha.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Proyecto Discover2Walk "Desarrollo de una plataforma robótica para ayudar a niños con Parálisis Cerebral a descubrir cómo caminar" (Ref. PID2019-105110RB-C31).

Referencias

- Banala, Sai K., Seok Hun Kim, Sunil K. Agrawal, and John P. Scholz. 2009. 'Robot Assisted Gait Training with Active Leg Exoskeleton (ALEX)'. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 17(1):2–8. doi: 10.1109/TNSRE.2008.2008280.
- Berger, Alisa, Fabian Horst, Fabian Steinberg, Fabian Thomas, Claudia Müller-Eising, Wolfgang I. Schöllhorn, and Michael Doppelmayr. 2019. 'Increased Gait Variability during Robot-Assisted Walking Is Accompanied by Increased Sensorimotor Brain Activity in Healthy People'. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 16(1):1–13. doi: 10.1186/S12984-019-0636-3/FIGURES/5.
- Fukuchi, Claudiane A., Reginaldo K. Fukuchi, and Marcos Duarte. 2018. 'A Public Dataset of Overground and Treadmill Walking Kinematics and Kinetics in Healthy Individuals'. *PeerJ* 6(4). doi: 10.7717/PEERJ.4640.
- Hobbs, Bradley, and Panagiotis Artemiadis. 2020. 'A Review of Robot-Assisted Lower-Limb Stroke Therapy: Unexplored Paths and Future Directions in Gait Rehabilitation'. *Frontiers in NeuroRobotics* 14:19. doi: 10.3389/FNBOT.2020.00019/BIBTEX.
- Hu, Xinyao, Fei Shen, Zhong Zhao, Xingda Qu, and Jing Ye. 2020. 'An Individualized Gait Pattern Prediction Model Based on the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator Regression'. *Journal of Biomechanics* 112. doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2020.110052.
- Koopman, B., E. H. F. van Asseldonk, and H. Van der Kooij. 2014. 'Speed-Dependent Reference Joint Trajectory Generation for Robotic Gait Support'. *Journal of Biomechanics* 47(6):1447–58. doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2014.01.037.
- Lora-Millan, Julio Salvador, Francisco José Sanchez-Cuesta, Juan Pablo Romero, Juan C. Moreno, and Eduardo Rocon. 2022. 'A Unilateral Robotic Knee Exoskeleton to Assess the Role of Natural Gait Assistance in Hemiparetic Patients'. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 19(1):1–24. doi: 10.1186/S12984-022-01088-2/FIGURES/16.
- Molteni, Franco, Giulio Gasperini, Giovanni Cannaviello, and Eleonora Guanziroli. 2018. 'Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review'. *PM&R* 10(9):S174–88. doi: 10.1016/J.PMRJ.2018.06.005.
- Samson, M. M., A. Crowe, P. L. de Vreede, J. A. G. Dessens, S. A. Duursma, and H. J. J. Verhaar. 2014. 'Differences in Gait Parameters at a Preferred Walking Speed in Healthy Subjects Due to Age, Height and Body Weight'. *Aging Clinical and Experimental Research* 2001 13:1 13(1):16–21. doi: 10.1007/BF03351489.
- Vallery, Heike, Edwin H. F. Van Asseldonk, Martin Buss, and Herman Van Der Kooij. 2009. 'Reference Trajectory Generation for Rehabilitation Robots: Complementary Limb Motion Estimation'. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 17(1):23–30. doi: 10.1109/TNSRE.2008.2008278.