Sistema de estimación de parámetros de marcha utilizando sensores inerciales, orientado a la realización de pruebas de desempeño físico en ancianos

Gianna Arencibia Castellanos[1]
Fidel Ernesto Hernández Montero [2]
José Javier Sierra Delgado[3]
Elías Osmany García Alvaredo[4]

[1] Centro de Neurociencias de Cuba, La Habana, Cuba, gianna960525@gmail.com
[2] Cujae, Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica, La Habana, Cuba, fhernandez@tele.cujae.edu.cu
[3] Cujae, Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica, La Habana, Cuba, josejaviersierra1998@gmail.com
[4] Cujae, Facultad de Telecomunicaciones y Electrónica, La Habana, Cuba, eliasgarcia2206@gmail.com

Resumen: El estudio de los indicadores del desempeño físico para caracterizar y determinar la fragilidad en adultos mayores, y para priorizar su atención especializada en el Sistema Nacional de Salud, que se realiza en nuestro país se efectúa visualmente, tiene carácter subjetivo, lo cual favorece la ocurrencia de errores a la hora de implementar el procedimiento. Este trabajo se orientó al desarrollo de un sistema de estimación de parámetros de marcha, en particular, velocidad promedio y cadencia, vinculado a la realización de pruebas de desempeño físico en ancianos. Las esencias fueron las siguientes:

- Utilización de sensores inerciales: esto conduce a un desarrollo de bajo costo y con posibilidades de ser aplicado en diferentes escenarios de la vida real.
- Transmisión de datos vía Bluetooth: Esta comunicación implica un menor gasto energético en relación con otros esquemas de comunicación inalámbrica.
- Aplicación de técnica de inteligencia computacional (red neuronal artificial) para estimar velocidad promedio de marcha (sensor inercial colocado en la zona lumbar).

Este sistema consta de dos módulos: (1) módulo de digitalización y transmisión hacia la computadora, que constituye un dispositivo electrónico portable, y (2) módulo de recepción y procesamiento, que constituye una computadora.

Como resultado de las pruebas realizadas, se constató que los errores absoluto y relativo obtenidos, en la estimación de la velocidad promedio, fueron de 0,063 m/s y 6,176 %, respectivamente, mientras que para el caso de la estimación de la cadencia, estas métricas fueron de 4,3 pasos/minuto y 4,563 %, respectivamente.

Palabras clave: **fragilidad física, envejecimiento, pruebas de desempeño, tecnología electrónica, sensores inerciales.**

I. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento poblacional, fenómeno irreversible que incluye cambios tanto estructurales como funcionales, ha adquirido una gran importancia en estos tiempos. Así lo confirma la tendencia demográfica que se desprende de los estudios más recientes, los cuales estiman que la población de más de 65 años pasará a ser más del doble en el año 2030 (1).

El cuidado y el monitoreo del adulto mayor es una de las acciones a realizarse alrededor de tan compleja situación, que, además, en el caso particular de Cuba se estima que está próximo a convertirse en el país más envejecido de América Latina.

La evaluación temprana de los signos y síntomas relacionados con el deterioro funcional contribuiría a la detección de ancianos frágiles, que pudieran recibir intervenciones terapéuticas, tanto en la atención primaria como la secundaria, con el objetivo de minimizar la aparición de desenlaces adversos. Los cambios demográficos ocurridos en las últimas décadas en todo el orbe han generado ya profundos impactos en la economía, a la vez que grandes afectaciones para la vida familiar, financiera y laboral de las personas (2). Se ha comprobado que la detección precoz del anciano frágil y el empleo oportuno de técnicas diagnósticas, terapéuticas y rehabilitadoras pueden impactar positivamente en la calidad de vida del adulto mayor (3). Diversas son las investigaciones realizadas sobre la importancia de los indicadores del desempeño físico para la clasificación del grado de funcionalidad en los ancianos (3, 4). Entre los parámetros más utilizados para la evaluación del desempeño físico están los relacionados con la marcha.

Dentro de los métodos utilizados para realizar el análisis de la marcha se encuentra el procesamiento de imágenes, donde generalmente se usan cámaras para registrar la marcha. Otro método popular para el análisis de la marcha es usar sensores colocados en el suelo, los cuales generalmente, son colocados a lo largo de un piso donde se realiza la caminata. Otro grupo de métodos para el análisis de la marcha es el uso de sensores portátiles que se colocan en varias partes del cuerpo. Algunos de los sensores populares utilizados para este propósito son: acelerómetros, giroscopios, sensores de presión piezoeléctricos / piezoresistivos, sensores de goniómetro (5). La combinación de sensores inerciales con dispositivos GPS (5) también ha sido empleada, al igual que el empleo de redes de sensores. Actualmente el uso de sensores de aceleración se ha popularizado en el campo de la telemedicina (6) debido al avance en las técnicas de diseño y fabricación que han conseguido miniaturizar y abaratar el coste de estos sensores.

En Cuba existe un antecedente de estudio de los indicadores del desempeño físico para caracterizar y determinar la fragilidad en adultos mayores (7, 8), y para priorizar su atención especializada en el Sistema Nacional de Salud. La evaluación de tales indicadores se ha realizado en el Centro de Investigación sobre Longevidad, Envejecimiento y Salud (CITED). Durante la evaluación, se miden, entre otros aspectos, parámetros de marcha, para lo cual se registran datos de velocidad, amplitud del paso, longitud de la zancada y cadencia. La velocidad de la marcha ha sido la variable más ampliamente estudiada, no solo como indicador del estado de salud, sino como predictor de estados de salud adversos (la institucionalización, la hospitalización y la muerte). La misma ha sido evaluada en múltiples estudios transversales y longitudinales. Este procedimiento se realiza visualmente y este carácter subjetivo favorece la ocurrencia de errores a la hora de implementar el procedimiento. Por ello, resalta la necesidad de técnicas objetivas para la estimación de estos parámetros, y que permitan identificar más objetivamente a los ancianos vulnerables y con mayor riesgo de presentar discapacidad.

Este trabajo tiene el objetivo de presentar el desarrollo de un sistema de estimación de parámetros de marcha, en particular, velocidad promedio y cadencia, orientado a la realización de pruebas de desempeño físico en ancianos. Este sistema consta de dos módulos: (1) módulo de digitalización y transmisión

hacia la computadora, que constituye un dispositivo electrónico portable, y (2) módulo de recepción y procesamiento, que constituye una computadora.

II. SISTEMA PROPUESTO

Las esencias de la propuesta fueron las siguientes:

- Utilización de sensores inerciales: esto conduce a un desarrollo de bajo costo y con posibilidades de ser aplicado en diferentes escenarios de la vida real.
- Transmisión de datos vía Bluetooth: esto limita la distancia que debe existir entre los módulos que componen el sistema, pero como la aplicación concreta no requiere significativas distancias, su uso es adecuado. Esta comunicación implica un menor gasto energético en relación con otros esquemas de comunicación inalámbrica.
- Aplicación de técnica de inteligencia computacional (red neuronal artificial) para estimar velocidad promedio de marcha (sensor inercial colocado en la zona lumbar).

Como se planteó en la Introducción, el sistema consta de dos módulos. Un módulo que corresponde con un desarrollo electrónico para digitalizar y transmitir señales por Bluetootth hacia una computadora, mientras que el otro constituye una computadora en la que corre un programa específico para recibir las señales y procesarlas para estimar velocidad promedio de marcha y cadencia.

A. Módulo electrónico de digitalización y transmisión de señales de sensores inerciales

Se desarrolló un sistema electrónico capaz de adquirir señales de un IMU las cuales serían transmitidas por Bluetooth hacia una computadora. En la Fig. 1 se muestra el diseño de este sistema conformado por un microcontrolador ESP32, un sensor MPU-9255, un interruptor y una batería.

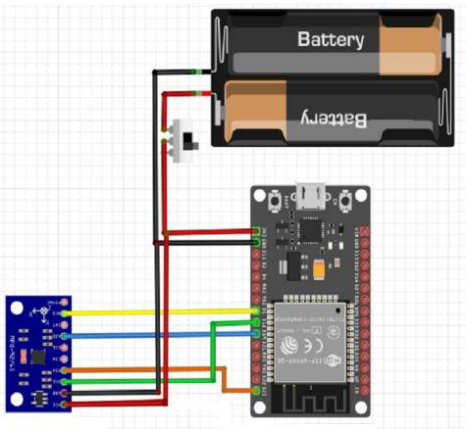

Fig. 1. Módulo de digitalización y transmisión de señales de sensores inerciales.

En este diseño, el ESP32 se encarga de establecer la frecuencia de muestreo de las señales de los sensores y su transmisión hacia la computadora. La batería permite la portabilidad del sistema.

Sin tener en cuenta los detalles, el programa que corre en el ESP32 se basa en el algoritmo simplificado mostrado en la Fig. 2. Es un ejemplo típico de sistema de control de la digitalización a través de la

interrupción de un temporizador. Una vez que se ha almacenado una cantidad determinada de muestras, se conforma un paquete que es transmitido por Bluetooth.

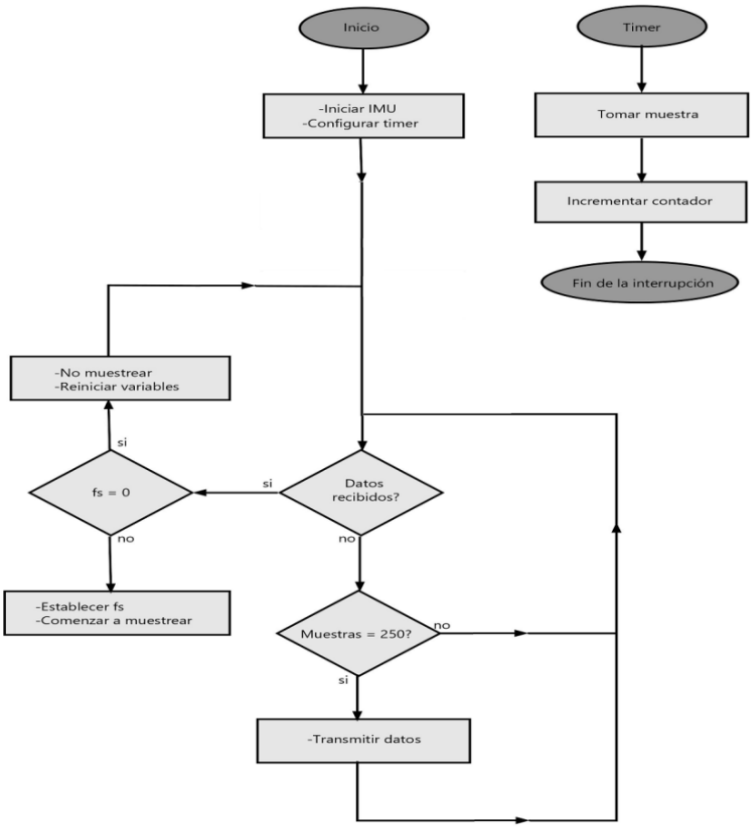

Fig. 2. Diagrama de flujo de la base del algoritmo que se ejecuta en el microcontrolador.

B. Módulo (computadora) para recibir las señales y procesarlas para estimar velocidad promedio de marcha y cadencia

El programa que corre en la computadora se realizó utilizando Python como lenguaje de programación. A través del programa desarrollado se procesaban las muestras que se iban recibiendo en tiempo real, sobre todo para detectar el momento en que el sujeto bajo prueba detenía su marcha. El programa es capaz de estimar velocidad promedio de marcha, para un sujeto que realiza una marcha a lo largo de una distancia mínima de 5 m. Es necesario mencionar que para realizar la prueba no es necesario medir la distancia recorrida; solo se debe asegurar que la distancia mínima a recorrer sea de aproximadamente 5 m.

Para estimar la velocidad de promedio, se aplica una red neuronal artificial (con lo cual es necesario extraer rasgos específicos para darlos a la entrada de dicha red), en concreto la misma que se presenta como resultado en (9).

Un enfoque genérico del algoritmo implementado se muestra en la Fig. 3.

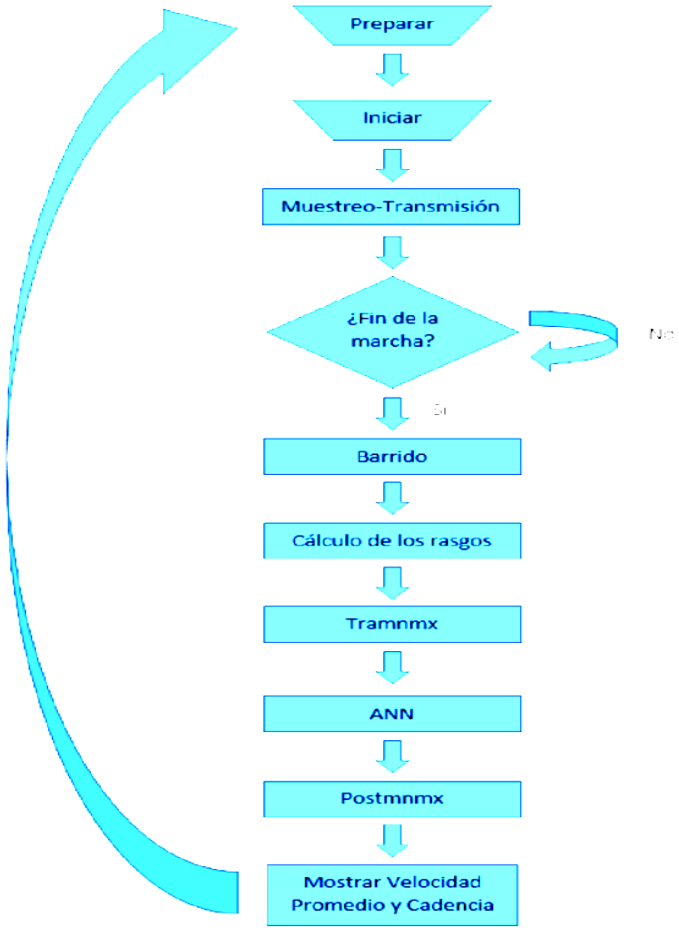

Fig. 3. Diagrama de flujo de la base del algoritmo que se ejecuta en la computadora.

III. RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestra cómo queda contenido el módulo electrónico dentro de un chasis. Es necesario mencionar que logró obtener un sistema ampliamente flexible, pequeño y con capacidad de portabilidad. En la Fig. 5 se observa su empleo en una de las pruebas realizadas.

Fig. 4. Módulo electrónico contenido en un chasis.

Fig. 5. Colocación del módulo electrónico para la realización de pruebas de estimación de parámetros de marcha.

Por su parte, la interfaz generada por el programa en la computadora se muestra en la Fig. 6. En esta interfaz se utilizaron semáforos que indicaban al operario del sistema que todo estaba listo para comenzar el análisis y ordenara al sujeto que comenzara a caminar.

Fig. 6. Interfaz usuario-computadora implementada.

En la validación del algoritmo de estimación de la velocidad promedio propuesto se comparó la velocidad estimada por este con la velocidad estimada por el método tradicional, el cual consiste en caminar una distancia determinada y medir el tiempo en el cual se ejecuta la marcha; de ahí, se determinó la velocidad promedio de referencia.

Se realizó un total de 82 pruebas con diferentes sujetos y a diferentes velocidades de marcha indicadas previamente, las cuales podían ser lentas o normales, con el fin de poseer un amplio rango de pruebas y no obtener resultados sesgados. Los resultados fueron los siguientes: la velocidad promedio de marcha estimada en las pruebas tuvo un error absoluto promedio de 0,063 m/s, un error relativo promedio de 6,176 % y un error cuadrático medio de 0,005 m^2/s^2. Para el caso de la cadencia, el error absoluto promedio fue de 4,3 pasos/minuto, mientras que el error relativo promedio fue de 4,563 %.

En la Fig. 7 se observa el gráfico de dispersión de las velocidades promedio en cada prueba: en azul, las calculadas por el método tradicional, y en rojo, las estimadas por el algoritmo propuesto. La figura 8

ofrece el respectivo gráfico de dispersión de la cadencia; igualmente en azul, las calculadas por el método tradicional, y en rojo, las estimadas. Las velocidades y cadencias de referencia (azul) fueron ordenadas de menor a mayor.

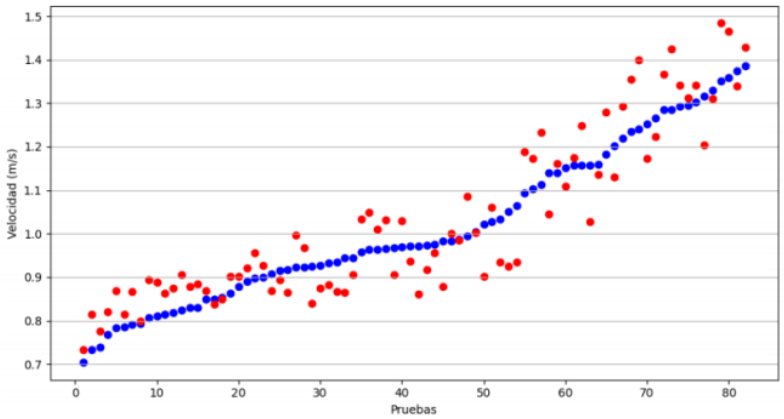

Fig. 7. Dispersión de las velocidades promedio estimadas en cada prueba (en rojo) alrededor de las velocidades promedio de referencia (en azul)

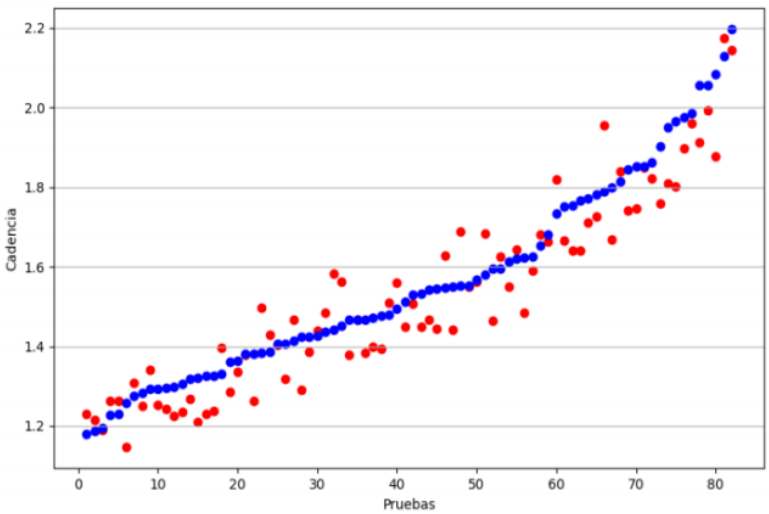

Fig. 8. Dispersión de las cadencias (pasos/segundo) estimadas en cada prueba (en rojo) alrededor de las cadencias de referencia (pasos/segundo) determinadas (en azul)

IV. AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales bajo el código PN305LH13-050

V. CONCLUSIONES

En el trabajo presentado se presentó la propuesta de desarrollo de un sistema de estimación de parámetros de marcha (velocidad promedio y cadencia), así como su validación. El sistema está compuesto por dos módulos: un bloque electrónico y la computadora, los cuales efectúan tareas diferentes, pero necesarias para el sistema como tal.

Por un lado, se alcanzó a disponer de un módulo electrónico capaz de digitalizar las señales de sensores inerciales y de transmitirlos vía Bluetooth. Por otro lado, se desarrolló un software que permite la estimación de los parámetros de marcha referidos.

Como resultado de las pruebas realizadas, se constató que los errores absoluto y relativo obtenidos, en la estimación de la velocidad promedio, fueron de 0,063 m/s y 6,176 %, respectivamente, mientras que para el caso de la estimación de la cadencia, estas métricas fueron de 4,3 pasos/minuto y 4,563 %, respectivamente.

REFERENCIAS

1. Rodríguez Cabrera A, Collazo Ramos M, Alvarez Vazquez L, Calero Ricardo J. Necesidades de atención en salud percibidas por adultos mayores cubanos. Rev. Cuba. Salud Pública. 2015;41(3):401-412.
2. Morejón S, Rodríguez Pérez Z. Las pruebas de desempeño físico en el pronóstico de desenlaces adversos en los ancianos., MediSan. 2018;22(6)466-470.
3. Rantanen T, Guralnik J, Leveille S. Coimpairments: strength and balance as predictors of severe walking disability. Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences. 1999;54(4):172-176.
4. Gerety MB, Mulrow CD, Tuley MR, Hazuda HP, Lichtenstein MJ, Bohannon R. Development and validation of a physical performance instrument for the functionally impaired elderly: the Physical Disability Index (PDI). Journal of gerontology. 1993;48(2):33-38.
5. Ikizoglu S, Sahin K, Atas A, Kara E, Çakar T. IMU Acceleration Drift Compensation for Position Tracking in Ambulatory Gait Analysis. 2017; CINCO:582-589.
6. Nguyen HT, Vu CC, Phan VQ, Nguyen VD. Design System to Remotely Monitor Patients with Parkinson's Disease. En: Toi, V, Lien Phuong T (eds) 5th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam. IFMBE Proceedings, 46. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11776-8_26.
7. García D, Piñera JA, García A, Bueno Capote C. Estudio de la fuerza de agarre en adultos mayores del municipio Plaza de la Revolución. Rev Cub Med Dep Cul Fís. 2013;8(1).
8. García Agustín D, Morejón S, de Dios C, Rodríguez Pérez Z. Las pruebas de desempeño físico en el pronóstico de desenlaces adversos en los ancianos, MediSan. 2018;22(6):466-470.
9. Arencibia Castellanos G, Hernández Montero FE, Aznielle Rodríguez TY. Gait Speed Estimation Based on Artificial Neural Network: Comparison with the Application of the Inverted Pendulum Model. En: Hernández Heredia Y., Milián Núñez V., Ruiz Shulcloper J. (eds) Progress in Artificial Intelligence and Pattern Recognition. IWAIPR 2021. Lecture Notes in Computer Science, 13055. Springer, Cham. 2021.