

Caracterización y procesamiento de señales de acelerómetros y giroscopios para evaluar la movilidad del adulto mayor

Agustina Nappa¹, Eder Peña²,
Natalia Garay³ and Franco Simini³

¹Estudiante del XXXIII Seminario de Ingeniería Biomédica 2024.

²Conferencista del Seminario del día 8 de mayo de 2024 de título "Diseño de dispositivos electrónicos para evaluación de la capacidad funcional en adultos mayores", Grupo de investigación en gerontología y geriatría, Universidad de Caldas, Colombia.

³Docentes del XXXIII Seminario de Ingeniería Biomédica 2024.

Abstract— Aging can lead to a deterioration in quality of life, making it a significant challenge today. It is essential to have devices that can accurately and effectively assess the functional capacity of the elderly. Accelerometers and gyroscopes are analyzed as they are innovative tools for this evaluation. These non-invasive devices allow for continuous and precise measurements of movement and balance, which are crucial for detecting changes in a person's daily physical activity. For full-body analysis, a triaxial accelerometer is used near the center of mass, at the pelvis. The results show how these devices can provide precise data on body dynamics and stability, which is vital information for identifying movement patterns and potential fall risks in older adults.

Keywords— Accelerometry, inertial sensors, functional capacity, gait, balance, aging.

Resumen— El envejecimiento puede llevar a un deterioro en la calidad de vida, por lo que es un gran desafío actualmente. Es necesario contar con dispositivos que evalúen de manera precisa y eficaz la capacidad funcional del adulto mayor. Se analizan acelerómetros y giroscopios ya que son herramientas innovadoras para esta evaluación. Son dispositivos no invasivos y permiten mediciones continuas y precisas del movimiento y equilibrio, esenciales para detectar cambios en la actividad física diaria de la persona. Para el análisis del cuerpo completo, se utiliza un acelerómetro triaxial cerca del centro de masas, en la pelvis. Los resultados muestran cómo estos dispositivos pueden proporcionar datos precisos sobre la dinámica y estabilidad corporal, que es una información muy importante para identificar patrones de movimiento y posibles riesgos de caídas en los adultos mayores.

Palabras clave— Acelerometría, sensores inerciales, capacidad funcional, marcha, equilibrio, envejecimiento.

INTRODUCCIÓN

El envejecimiento en las personas lleva consigo una serie de cambios físicos, cognitivos y sociales que pueden afectar su capacidad funcional y calidad de vida[1]. Mantener una buena capacidad funcional en la edad avanzada está asociado con una mejor calidad de vida, menor riesgo de discapacidad y menor dependencia de cuidadores y sistemas de atención médica. En este contexto, la evaluación de la capacidad funcional en los adultos mayores es uno de los principales desafíos del siglo XXI[2]. Esta evaluación es crucial para proporcionar a los pacientes la atención que necesitan según su diagnóstico. Además, es necesario que el dispositivo utilizado para la evaluación sea cómodo tanto para el paciente como para el personal de salud que lo utilice.

Una de las herramientas más prometedoras para realizar esta evaluación son los acelerómetros y giroscopios, sensores portátiles que permiten medir el movimiento y la actividad física de manera objetiva y precisa[3]. Los acelerómetros y giroscopios ofrecen varias ventajas para la evaluación de la capacidad funcional en adultos mayores. Estos dispositivos son pequeños, ligeros y no invasivos, lo que los convierte en el método más eficiente en la actualidad. Además, pueden proporcionar mediciones continuas y a largo plazo del movimiento, lo que permite detectar cambios sutiles en la actividad física y el equilibrio a lo largo del tiempo[4].

Sin la incorporación de tecnologías como los acelerómetros y giroscopios, la evaluación de la capacidad funcional en adultos mayores suele depender en gran medida de métodos subjetivos y observacionales. Los profesionales de la salud utilizan escalas de evaluación basadas en la observación directa del paciente durante actividades cotidianas,

cuestionarios autoadministrados o pruebas específicas de movilidad y equilibrio. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones en términos de objetividad, fiabilidad y precisión[5].

En esta monografía se analiza el funcionamiento de estos sensores, en particular para obtener señales de las mediciones de la evaluación del equilibrio, ritmo de marcha y control al levantarse-sentarse.

I. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica dirigida, utilizando las palabras claves ‘giroscopio’, ‘acelerómetro’, ‘adulto mayor’. Para buscar el material se utilizaron los portales Timbó Foco y Google Scholar.

II. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE ACELERÓMETROS Y GIROSCOPIOS

La capacidad funcional se define como la aptitud de un individuo para realizar tareas cotidianas. En el adulto mayor, esta capacidad se ve afectada por una disfunción cognitiva principalmente física, que generalmente afecta la memoria operativa, flexibilidad cognitiva y atención dividida o selectiva. Es importante tener un método preciso y certero para medir la capacidad funcional, ya que esto permite tener un diagnóstico y que el personal de salud brinde las herramientas necesarias para poder mejorar la calidad de vida del adulto mayor [6].

En esta sección se describen los dispositivos inerciales utilizados para la evaluación de la capacidad funcional en los adultos mayores cuando realizan distintas tareas: mantener el equilibrio, caminar y sentarse y levantarse de una silla.

Los acelerómetros y giroscopios son dispositivos denominados IMU (Unidad de medición inercial). Estos sensores se utilizan en la captura de movimiento, y para ello se componen de tres ejes perpendiculares en los que cada uno de los ejes contiene un acelerómetro y un giroscopio. De esta forma, los acelerómetros miden la aceleración lineal en tres dimensiones, mientras que los giroscopios miden la velocidad angular. En conjunto, estos sensores se utilizan para rastrear la posición y la orientación de un objeto o individuo en relación con un punto de inicio y la velocidad [7]. Además, para una mayor precisión se pueden incluir circuitos electrónicos para acondicionar y procesar las señales generadas por los sensores, así como algoritmos que a partir de las medidas de aceleración y velocidad angular obtengan valores de la orientación del dispositivo.

A. Acelerómetros.

Los acelerómetros son sensores capaces de registrar la aceleración de los objetos o individuos. Estos sensores son portátiles, cómodos y fáciles de fijarse al cuerpo del individuo. Pueden ser de tres tipos dependiendo del número de ejes en los que se registren las aceleraciones: uniaxiales, que registran los movimientos en un único eje (generalmente vertical), los biaxiales, sensibles a movimientos en dos ejes (vertical y antero-posterior) y triaxiales, sensibles a movimientos en los tres ejes (vertical, antero-posterior y lateral). En la actualidad, los acelerómetros comerciales son triaxiales, debido a que estos dispositivos proporcionan más información para ser utilizada en los modelos de estimación de la capacidad funcional [7].

Los acelerómetros basan su funcionamiento en la Segunda Ley de Newton. Proporcionan una medida de la segunda derivada de la posición (ecuación de segundo orden), es decir de la aceleración. Al resolver la ecuación de segundo orden con sus respectivas condiciones iniciales, es posible obtener la velocidad con la cual se mueve el objeto o individuo, así como la posición en la cual se encuentra, tomando como punto de referencia (o condición inicial), la lectura de cuando acelerómetro se encuentra en reposo, en base a su inclinación con respecto a la horizontal [8].

Existen diversos tipos de acelerómetros. Los más utilizados actualmente son los acelerómetros piezoeléctricos, capacitivos, los cuales pertenecen a un grupo denominado sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) y piezorresistivos. Cada tipo de acelerómetro tiene sus propias ventajas y es seleccionado según la aplicación específica, las condiciones de operación y los requisitos de precisión y costo. Los que analizan de forma más precisa el movimiento humano, y por lo tanto los más utilizados para esto en la actualidad son los acelerómetros capacitivos. Dichos acelerómetros contienen dos placas conductoras en su interior: una estática, utilizada como punto de referencia, y otra dinámica, que se mueve (ya que está sostenida por pequeños resortes) junto con la masa cuando esta es afectada por alguna aceleración[9]. La capacitancia está dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

donde ϵ_0 es la constante dieléctrica (en este caso del aire), A es el área de las placas, y d es la distancia entre las placas. Por lo tanto, la capacitancia únicamente varía en función de la distancia entre las placas. Si se parte de un estado de reposo con una cantidad estable de cargas eléctricas acumuladas en las placas del capacitor, y debido a una aceleración

estas se comienzan a juntar, la capacitancia aumentará. Al ocurrir esto, una mayor cantidad de portadores de carga se moverán hacia las placas, generando una corriente eléctrica que puede ser medida. Lo contrario ocurre cuando la masa se comienza a alejar, la capacitancia disminuirá, los portadores de carga se alejarán de las placas, y se generará una corriente en el sentido opuesto. A partir de estas corrientes se obtiene el voltaje, el cual es pasado por filtros para eliminar las componentes del ruido no deseado de vibraciones o del ambiente, y de esta forma obtener una señal de voltaje que varía suavemente con el tiempo, representando la aceleración [10]. Este tipo de acelerómetros se realizan en tamaños muy pequeños, de forma que puedan ser colocados en dispositivos electrónicos. Sin embargo, la desventaja que presentan es que al utilizar el aire como constante dieléctrica del capacitor, cuando esta cambia (por ejemplo, al aumentar la humedad en el ambiente), la precisión del sensor se puede ver afectada.

B. Giros copios.

Los giros copios son dispositivos que pueden cumplir dos funciones: entregar información sobre la variación de la orientación de un sistema con respecto a un eje de referencia, o entregar información sobre la velocidad con que varía la orientación de un sistema cuando se encuentra rotando, es decir, su velocidad angular[9]. Existen tres tipos de giros copios: Mecánicos, vibratorios de efecto Coriolis, y ópticos. Los que analizan de forma más precisa el movimiento humano son los vibratorios, que al igual que los acelerómetros capacitivos, pertenecen al grupo de sensores MEMS, debido a su tamaño reducido para poder integrarse en pulseras u otros dispositivos electrónicos cómodos para el paciente.

Los giros copios vibratorios basan su funcionamiento en la aceleración de Coriolis. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a las componentes radial y tangencial de la velocidad del cuerpo. Utilizando la Segunda Ley de Newton, la velocidad angular del sistema se puede expresar como:

$$Velocidad\ angular = \frac{Fuerza}{Masa*(-2*Veloc.\ Radial)} \tag{2}$$

Basándose en la ecuación anterior, el giroscopio contiene en su interior una masa, la cual es forzada a oscilar con una frecuencia determinada. Debido a esto, cuando el sistema se ha rotado, la masa oscilante experimentará una frecuencia de Coriolis que la desplazará hacia la izquierda o la derecha dependiendo de la dirección de la vibración. De manera similar a los acelerómetros, este desplazamiento puede ser utilizado para calcular la fuerza que experimentó la masa, y de esta forma obtener la velocidad angular del sistema [11].

III. MEDICIÓN DE ALGUNOS MOVIMIENTOS DEL ADULTO MAYOR: MARCHAR, MANTENER EL EQUILIBRIO, Y SENTARSE Y LEVANTARSE DE UNA SILLA.

El cuerpo humano realiza numerosos movimientos medibles, y dependiendo del objetivo del estudio, se colocan acelerómetros en ubicaciones específicas. En estudios que analizan el cuerpo completo, se utiliza un acelerómetro triaxial cerca del centro de masas, en la pelvis. Además, se deben filtrar y minimizar las aceleraciones no deseadas, como las causadas por movimientos de tejidos blandos o vibraciones externas. A continuación, se presentan las gráficas obtenidas en el estudio, mostrando los movimientos medidos con acelerómetros y giros copios en distintas partes del cuerpo.

Marcha

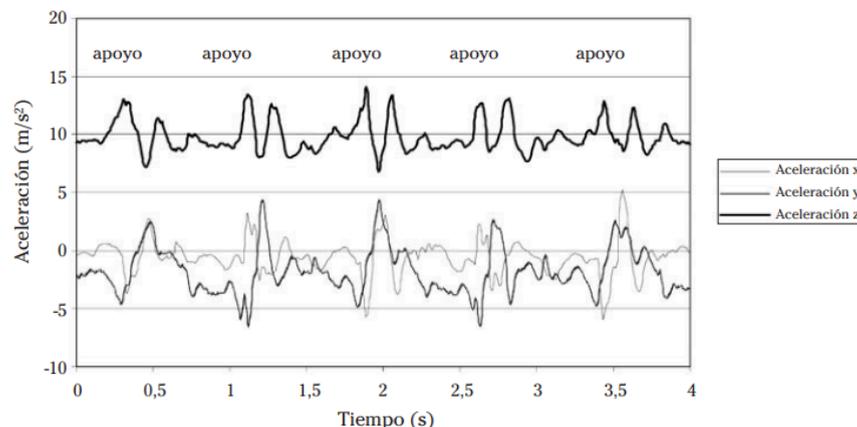


Figura 1: Aceleraciones obtenidas durante la marcha con un acelerómetro triaxial colocado en la zona lumbar del sujeto. Obtenida de: [12].

La gráfica muestra las componentes de la aceleración en los ejes X, Y y Z obtenidas mediante un acelerómetro triaxial en la zona lumbar de un sujeto durante la marcha. La aceleración en el eje X refleja el balanceo lateral del tronco, mientras que la aceleración en el eje Y representa movimientos anteroposteriores, típicos de una marcha estable. La componente más relevante es la aceleración en el eje Z, que indica los impactos de los pies con el suelo durante el apoyo. Los picos en la aceleración Z corresponden a eventos de apoyo, y su consistencia refleja la regularidad de la marcha. Variaciones significativas en la altura y el espaciado de estos picos pueden indicar problemas de equilibrio o coordinación.

La gráfica también permite identificar diferencias en los patrones de aceleración entre individuos con y sin predisposición a caídas, proporcionando información valiosa para intervenciones preventivas. En resumen, esta gráfica ofrece una visión detallada del comportamiento del tronco durante la marcha, siendo esencial para evaluar la estabilidad y la regularidad del movimiento, especialmente en estudios de prevención de caídas en adultos mayores.

Sentarse y levantarse de una silla

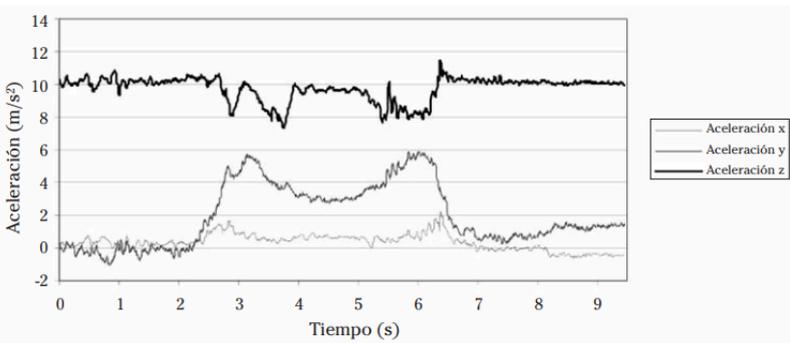


Figura 2: Aceleraciones obtenidas durante el movimiento de sentarse y levantarse con un acelerómetro triaxial colocado en la zona lumbar. Obtenida de: [12].

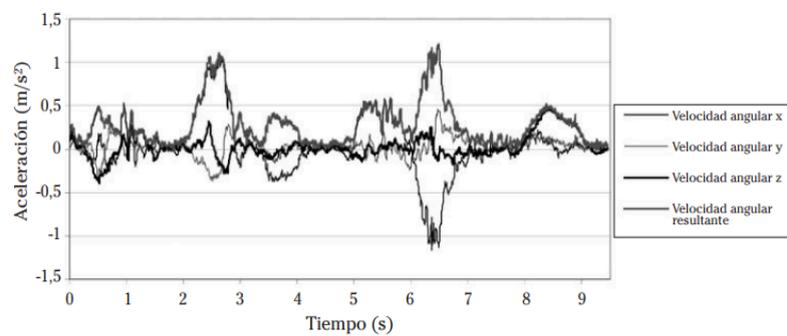


Figura 3: Velocidades angulares obtenidas durante el movimiento de sentarse y levantarse con un giroscopio triaxial colocado en la zona lumbar. Obtenida de: [12].

La Figura 2 muestra las aceleraciones en los ejes X, Y y Z durante los ejercicios de levantarse y sentarse, registradas con un acelerómetro triaxial en la zona lumbar. Las máximas aceleraciones coinciden con los momentos de impulso. El eje X refleja movimientos laterales, el eje Y muestra movimientos anteroposteriores pronunciados y el eje Z picos claros en los impulsos, destacando el esfuerzo vertical. Estas aceleraciones ayudan a entender la dinámica del movimiento y evaluar la fuerza y estabilidad del sujeto.

Por otro lado, la Figura 3 presenta las velocidades angulares en los ejes X, Y y Z, medidas con un giroscopio triaxial en la misma ubicación. La velocidad angular en el eje X indica la rotación lateral del tronco, en el eje Y la rotación anteroposterior y en el eje Z la rotación alrededor del eje vertical, crucial para el equilibrio. Estas velocidades angulares evalúan la agilidad y control del movimiento, siendo mayores en sujetos con mejor estado físico y coordinación.

Las gráficas combinadas de aceleraciones y velocidades angulares ofrecen una visión completa de los movimientos al sentarse y levantarse, permitiendo identificar patrones y variaciones indicativos de la funcionalidad y posibles problemas de movilidad. Estas medidas son esenciales para evaluar la capacidad funcional en adultos mayores y diseñar intervenciones para mejorar su estabilidad y prevenir caídas.

Equilibrio

La evaluación del equilibrio en adultos mayores es fundamental para identificar riesgos de caídas y problemas relacionados con la estabilidad postural, es decir, la habilidad para mantener una postura, sin necesidad de mover la base de apoyo. Esta tarea implica la integración de la información sensorial del cuerpo, abarcando tanto la percepción de la posición corporal en relación con el entorno como la capacidad para generar las fuerzas necesarias para controlar el movimiento.

La señal obtenida de un acelerómetro en el sacro durante la evaluación del equilibrio postural ofrece dos parámetros clave: la amplitud y la frecuencia. Estos parámetros reflejan los movimientos del centro de masa del cuerpo, y su análisis puede revelar signos de inestabilidad postural. Las amplitudes grandes en la señal del acelerómetro indican mayores desplazamientos del cuerpo en respuesta a pequeños desequilibrios, lo cual es un claro signo de inestabilidad.

Por otro lado, las frecuencias altas en la señal son indicativas de movimientos rápidos y erráticos del cuerpo, sugiriendo una menor capacidad para mantener el equilibrio.

Comparar la amplitud y frecuencia de las señales del acelerómetro bajo distintas condiciones permite determinar cómo varía el control corporal del adulto mayor bajo distintos desafíos. Por ejemplo, evaluar el equilibrio de pie en una superficie firme proporciona una línea base de control postural, mientras que estar de pie en una superficie blanda aumenta la dificultad del control postural y puede revelar problemas de equilibrio que no se manifiestan en superficies firmes. Asimismo, la postura con los pies juntos reduce la base de apoyo y aumenta la dificultad para mantener el equilibrio, mientras que con los pies separados se ofrece una base de apoyo más amplia y generalmente más fácil de mantener. Por otro lado, la evaluación con los ojos abiertos proporciona una referencia básica, ya que la visión ofrece información crucial para el equilibrio. Sin embargo, cerrar los ojos desafía el sistema de equilibrio y revela la dependencia en los otros sistemas sensoriales, como los propioceptivos y vestibulares.

IV. DISCUSION Y CONCLUSION

Los acelerómetros y giroscopios, al ser pequeños, ligeros y no invasivos, pueden integrarse fácilmente en dispositivos portátiles que los pacientes pueden usar durante sus actividades cotidianas. Esto facilita la recopilación de datos en tiempo real y a largo plazo, proporcionando una visión más completa y precisa del estado funcional del paciente.

La implementación de acelerómetros y giroscopios en la evaluación de la capacidad funcional de los adultos mayores ofrece una ventaja significativa sobre los métodos tradicionales. Estos dispositivos permiten mediciones objetivas y continuas, lo cual es esencial para detectar cambios sutiles en la movilidad y el equilibrio que no podrían identificarse con métodos observacionales y subjetivos. Además de ser herramientas eficaces y fiables, tienen un bajo costo económico: con un solo acelerómetro triaxial en la cintura, se pueden medir movimientos, actividad física, gasto energético, equilibrio y otras funciones esenciales. La combinación con giroscopios mejora aún más la precisión al añadir datos sobre orientación y cambios de posición.

REFERENCIAS

- [1] «Biology of Aging», National Institute on Aging. Accedido: 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nia.nih.gov/about/budget/biology-aging-3>
- [2] «Changes That Occur to the Aging Brain | Columbia Mailman», Columbia University Mailman School of Public Health. Accedido: 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.publichealth.columbia.edu/news/changes-occur-aging-brain-what-happens-when-we-get-older>
- [3] «Neuromusculoskeletal Research Laboratory». Accedido: 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://research.ohio.edu/clark-brian/publications/impaired-dopaminergic-function-associated-mobility-capacity-older-adults>
- [4] F. Porciuncula *et al.*, «Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances», *PM&R*, vol. 10, n.º 9S2, sep. 2018, doi: 10.1016/j.pmrj.2018.06.013.
- [5] M. C. Vargas-Del-Valle *et al.*, «Implementaciones tecnológicas en la prueba de valoración funcional y desempeño corto Short Physical Performance Battery (SPPB), para el adulto mayor», *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 35, n.º 2, pp. 125-138, jun. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i2.5206.
- [6] Z. E. Leitón Espinoza *et al.*, «Cognición y capacidad funcional en el adulto mayor», *Rev. Salud Uninorte*, vol. 36, n.º 1, pp. 124-139, abr. 2020, doi: 10.14482/sun.36.1.618.97.
- [7] de M. Filho y J. Alves, «Nuevas perspectivas en la metodología de validación de acelerómetros para la estimación de la actividad física en adultos mayores», 2015, Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10550/50825>
- [8] D. Octavio *et al.*, *DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS ESPECÍFICOS DE LA CABEZA CON EL ACELERÓMETRO Y GIROSCOPIO, MEDIANTE CORRELACIÓN CRUZADA*. 2013.
- [9] J. F. G. García, «Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias».
- [10] M. J. M. Ayora, «Análisis Experimental de la Respuesta de un Acelerómetro MEMS».
- [11] D. F. P. Espín y N. Sotomayor, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA PARA MEDIR ÁNGULOS DE INCLINACIÓN USANDO SENSORES INERCIALES COMO ACELERÓMETRO Y GIROSCOPIO».
- [12] M. Izquierdo, A. Martínez-Ramírez, J. L. Larrión, M. Irujo-Espinosa, y M. Gómez, «Valoración de la capacidad funcional en el ámbito domiciliario y en la clínica: Nuevas posibilidades de aplicación de la acelerometría para la valoración de la marcha, equilibrio y potencia muscular en personas mayores», *An. Sist. Sanit. Navar.*, vol. 31, n.º 2, ago. 2008, doi: 10.4321/S1137-66272008000300006.