

Estudio de la marcha mediante análisis simultáneo de marcadores ópticos y EMG

María Belén Aguirre Larrieu^{†1}

[†]*Instituto de Ingeniería eléctrica, Facultad de Ingeniería Udelar
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay*

¹mabelenaguirre94@gmail.com

Abstract—Gait analysis has been of great significance for decades and as a result has created great impact in medical advances and sports, which justifies the large scale investment in this area. The technological advances have been substantial in these studies and the two most valuable tools are electromyography (EMG) and stereophotogrammetry.

EMG is the technique which measures electrical signals that muscles receive, while stereophotogrammetry measures or calculates different parameters of the bodies movement by creating a 3D human model in motion. The use of both techniques together broadens our vision into understanding how muscles work when they move. Due to this, and to the fact that there is still much more to learn about these aspects, there are many laboratories exclusively dedicated to Gait analysis.

Resumen— El análisis de la marcha ha sido de gran importancia en distintos ámbitos desde hace varias décadas, con gran impacto en avances médicos y en distintas disciplinas deportivas, razón por la cual hay mucho dinero invertido en este análisis. El avance de la tecnología ha sido clave en los estudios y dos valiosas herramientas para ello son la electromiografía (EMG) y la fotogrametría; la EMG es la técnica que mide las señales eléctricas que reciben los músculos y la fotogrametría utiliza sensores para construir un modelo en tres dimensiones del ser humano marchando, para poder medir o calcular distintos parámetros de interés. El uso de ambas técnicas en conjunto permite una mejor visión acerca de como funcionan los músculos al moverse y debido a esto y a que aún hay mucho por descubrir es que hoy en día existen laboratorios dedicados exclusivamente al estudio de la marcha.

I. PALABRAS CLAVE

Electromiografía, fotogrametría, marcha, sensores.

II. INTRODUCCIÓN

La marcha constituye la forma de desplazamiento cíclico básico, por lo tanto el estudio de la misma, ya sea en una persona sana o con alguna patología, brinda gran información acerca de la actividad neuromuscular y esqueleto-muscular, la coordinación de los músculos al marchar, entre otros. En algunos deportes, un estudio exhaustivo del accionar de los músculos durante la marcha permite un análisis para la optimización del movimiento y mejor desempeño en la disciplina.

El estudio de la marcha se basa en tres grandes puntos: la cinética, cinemática y la electromiografía. Es clave el uso de las tres herramientas en conjunto, dado que la cinética y la cinemática dan información sobre todos los músculos actuando en conjunto, mientras que la electromiografía aporta el dato de la contribución individual de cada músculo.

La observación también es una de las herramientas para el estudio, pero no es suficiente.

En el desarrollo de este documento se mostrarán técnicas de estudio de la marcha, en particular el uso de electromiografía y sensores ópticos.

III. MARCHA

La marcha humana es un acto de alta complejidad que requiere de la coordinación y activación de gran cantidad de músculos del cuerpo. Para su estudio, se considera la marcha como una secuencia de movimientos que constituyen el ciclo de marcha.

Durante la marcha se pueden reconocer tres estados que se distinguen según la velocidad de avance del centro de masa del cuerpo y son: estado de desarrollo, que refiere al momento en que en el cuerpo sale del reposo hasta que alcanza una velocidad relativamente constante, el estado rítmico, donde dicha velocidad se mantiene y el estado de declinación, donde el centro de masa reduce su velocidad hasta el reposo. Los estudios clínicos de la marcha suelen tener lugar durante el estado rítmico, es por eso que es en este estado donde se detallan los eventos y se define el ciclo de marcha; se elige un pie de referencia y se da inicio al ciclo cuando se apoya dicho pie y se finaliza cuando se vuelve a apoyar el mismo pie. Este estado se puede dividir en dos fases, la primera es llamada fase de apoyo y sucede cuando el pie de referencia está en contacto con el suelo. La segunda fase es la de balanceo y refiere al momento en el cual el pie mencionado se encuentra en el aire.

Para profundizar aún más el análisis, las dos fases mencionadas se dividen en tres períodos cada una [7]:

1) Fase de Apoyo:

- Doble apoyo inicial: Desde el apoyo del pie de referencia hasta la elevación del pie opuesto.
- Apoyo simple: Desde el desprendimiento del pie opuesto hasta su apoyo, mientras que el pie de referencia esta en contacto con el piso.
- Segundo doble apoyo: Desde el toque del pie opuesto hasta el desprendimiento del de referencia.

2) Fase de Balanceo:

- Balanceo inicial: Desde el desprendimiento del pie de referencia hasta el momento que pasa al frente del pie opuesto.
- Balanceo medio: Desde que el pie de referencia pasa al otro pie hasta en que la tibia queda perpendicular a la superficie de apoyo.

- Balanceo terminal: Desde que la tibia queda perpendicular a la superficie hasta que el pie de referencia vuelve a tocar el suelo.

El ciclo de marcha descrito se utiliza en los estudios clínicos en términos de porcentaje, siendo la fase de apoyo de una duración de 62% donde el período de doble apoyo inicial ocupa el primer 12%, el apoyo simple el siguiente 38% y el segundo doble apoyo el último 12%. El 38% restante del ciclo lo ocupa la fase de balanceo. Estos porcentajes corresponden a un adulto estándar caminando a 80m/min, por lo tanto los porcentajes pueden diferir según el estudio.

IV. TÉCNICAS DE ESTUDIO

A. *Electromiografía*

La electromiografía se trata de una técnica que registra la actividad eléctrica de los músculos. Se basa en que la activación muscular implica una difusión de iones previo al movimiento, que genera un campo eléctrico a su alrededor proporcional a la concentración iónica el cual es detectado a través de electrodos que están conectados a un computador que es capaz de analizar la señal obtenida [4].

El uso de la electromiografía como herramienta de estudio se remonta a la primer mitad del siglo XX y ha sido mejorada gracias a los grandes avances de la tecnología. En un principio, se utilizaban electrodos de alambre fino y era necesario insertar dos por cada músculo a estudiar, lo cual lo hacía un proceso incómodo e incluso doloroso [8] por lo que luego se utilizaron también electrodos de superficie. La gran desventaja era que no era posible sincronizar los valores medidos con el ciclo de marcha, es decir, se obtenían valores de actividad de los músculos en un instante pero no se podía saber exactamente en que porcentaje del ciclo de marcha se encontraba.

El procesamiento de datos de electromiografía por computadora fue introducido en los años 60 por la Dra. Jacqueline Perry y fue crucial para el sincronismo de los datos obtenidos con los porcentajes del ciclo de marcha. Además agregó nuevos datos como la velocidad, frecuencia y longitud de pasos, entre otros parámetros claves para el estudio completo de la marcha [8]. El procesamiento de la señal puede basarse en un análisis en frecuencia o en amplitud [4] y se vale de técnicas de filtrado, rectificación, suavización, normalización y descomposición en frecuencias de dicha señal.

La Dra. Perry también profundizó sobre los electrodos utilizados para captar las señales, concluyendo que los electrodos de superficie son más propensos a errores en interpretación por que pueden captar señales eléctricas de músculos vecinos [8], fenómeno denominado 'crosstalk'. Hoy en día se utilizan de superficie siempre que se pueda dado que son no invasivos y más prácticos. Estos electrodos definen un volumen de conducción [4], que refiere al volumen que debe atravesar la señal eléctrica hasta llegar al electrodo, por ende cuanto más alejado de la piel este el músculo de interés, mayor será el volumen de conducción y menor será la energía de la señal al llegar al electrodo y mayor será el ruido interferente, por lo que se dejan los electrodos de alambre fino para estos casos de músculos muy alejados de la superficie o muy pequeños. Como se puede

intuir, es crucial la posición de los electrodos sobre la piel y por ello existen guías destinadas a esto.

Lo que es aún más importante en cuanto a la colocación de los electrodos, es que la señal electromiográfica varía según la posición [4], por lo tanto no se podrían comparar señales si los electrodos no se encontraran siempre en la misma posición y no se podrían reconocer los patrones de señales que tan importantes son para el estudio. La ubicación más recomendada es en la línea media del vientre muscular, entre la unión miotendinosa y el punto motor [4].

Aunque todos los que han profundizado en el tema concuerdan con que en condiciones isométricas, es decir cuando los músculos generan una tensión pero permanecen estáticos, los niveles de EMG se relacionan linealmente con la actividad de los músculos, ha habido mucha controversia sobre la relación de la electromiografía con la actividad de los músculos en condiciones dinámicas, dado que se piensa que la relación no puede ser lineal ya que todo cambia de un instante a otro.

Las mayores desventajas de la técnica son entonces la dificultad del procesamiento de la señal registrada debido al ruido interferente y la interpretación de la información que aporta la misma.

Por otro lado, la electromiografía tiene como ventaja que se puede medir el tiempo de actividad muscular, permitiendo así saber si un músculo participa en un determinado movimiento y además muestra si la contracción de los músculos es alta o baja, pero como ya se discutió, no determina como es la contracción del músculo, la información que aporta es principalmente cualitativa.

Esta técnica ha contribuido de manera muy positiva en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Por ejemplo, gracias al estudio de la marcha a través de EMG se ha cambiado totalmente la estructura del tratamiento de personas con parálisis cerebral. También ha ayudado a comprender como se relacionan las distintas partes de los miembros inferiores al caminar lo que es un factor crucial para la fabricación de prótesis.

B. *Sensores ópticos*

Durante el análisis de la marcha se busca obtener parámetros del aparato locomotor tales como el movimiento del centro de masa, el movimiento relativo entre huesos, articulaciones, músculos o ligamentos, fuerzas intercambiadas con el entorno o fuerzas entre los músculos, entre otros. Dado que dichos parámetros no se pueden medir con facilidad en la realidad, se recurre a una representación virtual en 3D del cuerpo en movimiento que permite medir o estimar a través de la matemática los parámetros deseados [2]. El relevamiento de datos para realizar el modelo en 3D se realiza a través de marcadores posicionadas estratégicamente en la piel que dan información sobre la posición instantánea de las mismas. Los datos se obtienen usando la técnica de fotogrametría, donde una de las tecnologías disponibles para esta obtención es la óptica.

El estudio de la marcha mediante sensores ópticos se basa en el uso de cámaras infrarrojas que detectan las posiciones de los marcadores colocadas sobre la piel y mandan la información a un software el cual a través de técnicas de procesamiento de imágenes es capaz de reconstruir un

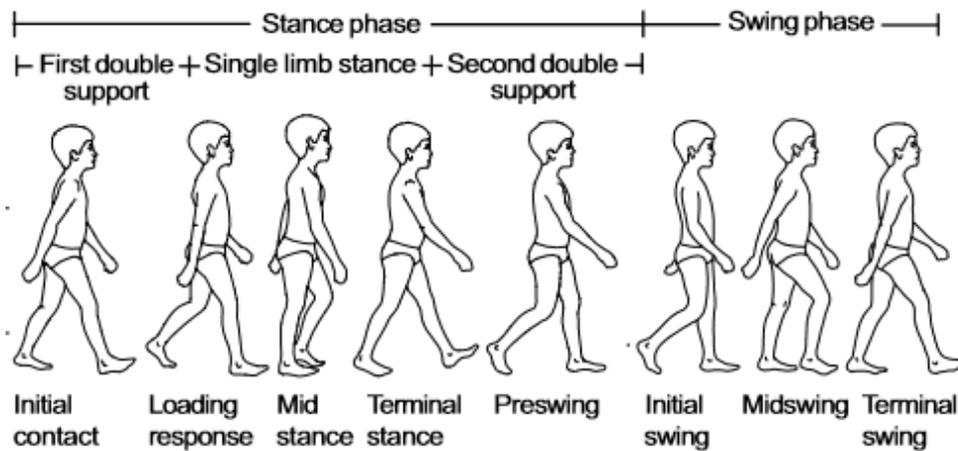


Fig. 1. [7] Ciclo de la marcha

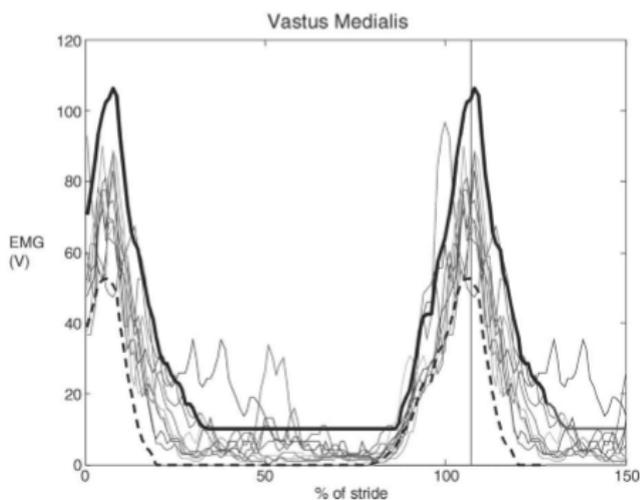


Fig. 2. Imagen típica de señales electromiográficas. [3] Señales de EMG normalizadas del músculo vasto medial obtenidas de diez sujetos normales con electrodos de superficie para la detección de perfiles no estandar de caminata.

modelo en tres dimensiones del humano en movimiento y de esta manera se pueden obtener los parámetros de interés de dicho movimiento [1]. Para el posicionamiento de los marcadores existen protocolos de referencia, entre ellos Newington, Gage, Davis o el modelo VCM (Vicon Clinical Manager) [5].

El modelo antropomórfico se constituye de una cadena de enlaces en donde cada uno representa un segmento del cuerpo, compuesto de una parte de hueso y otra de tejido blando. Para el modelo se considera cada segmento como un cuerpo rígido, siempre y cuando cada segmento represente un solo hueso y los tejidos blandos pueden considerarse deformables o no según la aplicación. Si se considera no deformable, la mecánica clásica resuelve fácilmente todo el problema, pero ha sido demostrado que considerar este modelo simplificado puede afectar el resultado. Los grados de libertad del modelo están determinados por la cantidad de segmentos que se unan en una articulación y la cantidad de restricciones que la misma imponga, generalmente se trabaja entre uno y cinco [2].

Para la comparación y repetitividad de los análisis los

vectores que miden la posición de los sensores del cuerpo deben estar referidos a un mismo sistema de ejes y la única manera de lograr esto, es que los ejes sean solidarios a la misma forma del cuerpo. Para el estudio de la marcha, utilizando el modelo de cuerpo rígido para los huesos, alcanza con definir dos sistemas de ejes: locales y globales. Los sistemas de ejes locales son los que se definen solidarios al segmento de análisis y describen la posición relativa del mismo a los sistemas de ejes globales. Es muy importante tener bien definida la posición relativa del origen del sistema de ejes local con respecto al origen del global, dado que esto permite que a través de cálculos se pueda representar el movimiento medido con un determinado marco global desde otro distinto. Existen guías y recomendaciones a tener en cuenta para elegir los sistemas de ejes. Además, a través de herramientas matemáticas, en particular la derivación de vectores y operaciones con matrices, es posible obtener valores de velocidad y aceleración de los segmentos [2].

Una de las mayores desventajas del análisis mediante esta técnica es que está restringida a un lugar de trabajo y por ende no logra estudiar la marcha en condiciones normales de la persona. Además, se enfrenta al problema de obstrucción y sombras que pueden alterar la imagen obtenida y también a la gran incertidumbre que se produce cuando se superponen músculos o articulaciones de interés durante el mismo movimiento a estudiar. [1] por lo tanto impone una dificultad para músculos o articulaciones pequeñas.

V. ANÁLISIS SIMULTÁNEO

Un laboratorio dedicado al análisis de la marcha se vale de las dos técnicas estudiadas en las secciones anteriores y típicamente suele complementar estas medidas con otras como por ejemplo la fuerza, a través de platos de fuerza que son capaces de medir la magnitud de la fuerza que le ejerce el humano al piso durante el ciclo de marcha.

La utilización en conjunto de ambas técnicas es vital para la comprensión de la marcha, dado que al tener definido el ciclo de la marcha y poder sincronizar lo observado en el modelo 3D en la computadora y la actividad de cada músculo se puede saber cuáles son los que intervienen en cada fase y con cuánto peso lo hacen.

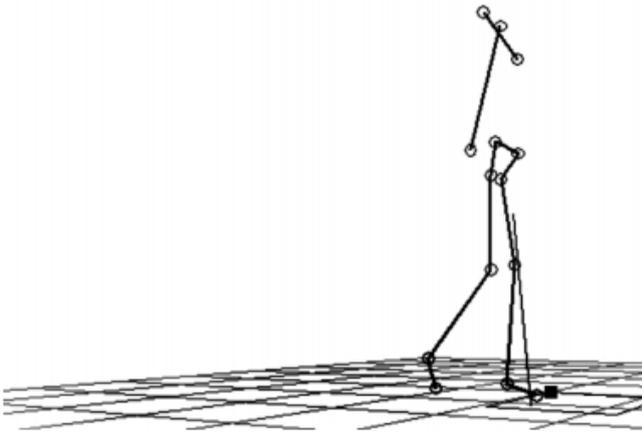


Fig. 3. [5] Imagen típica de la reconstrucción 3D a través de sensores ópticos.

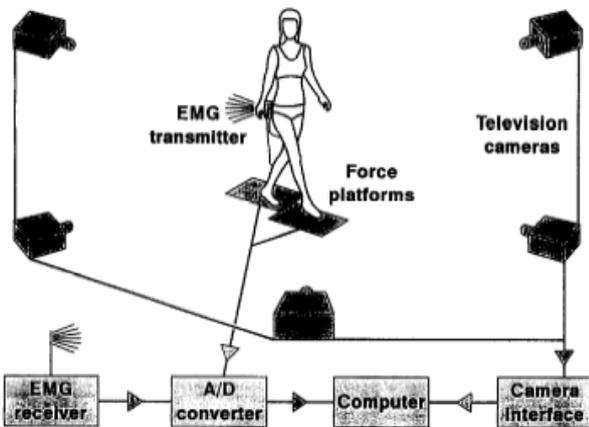


Fig. 4. [8] Esquema de un laboratorio típico para el análisis de la marcha

Como ya se mencionó anteriormente, existe cierta incertidumbre en el momento de interpretar la información que brinda la electromiografía y contrastarla con los datos relevados con otras técnicas como la de los sensores ópticos, pero es seguro que si se hace un buen uso de esta herramienta, puede ser de gran ayuda. Por ejemplo, al momento de realizar un diagnóstico de una patología asociada al sistema locomotor y realizar una reconstrucción 3D se puede observar en que zona está sucediendo la anomalía y al agregar la electromiografía se puede detectar exactamente que músculo es el que está recibiendo con baja intensidad la orden de moverse como debería o directamente no la está recibiendo. Es por esto que muchas veces se utilizan las señales electromiográficas como un diagrama "on-off" (prendido-apagado), como se muestra en la Figura 5.

VI. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del trabajo se pudo ver como la electromiografía y los sensores ópticos constituyen la base del estudio de la marcha. Las dos técnicas poseen ventajas y desventajas, pero debido al gran impacto que tienen sus resultados en distintos campos se puede considerar que vale la pena sortear las desventajas y utilizar dichas técnicas. En el área de la medicina, la comprensión de la marcha es de gran utilidad para la construcción de prótesis, para el

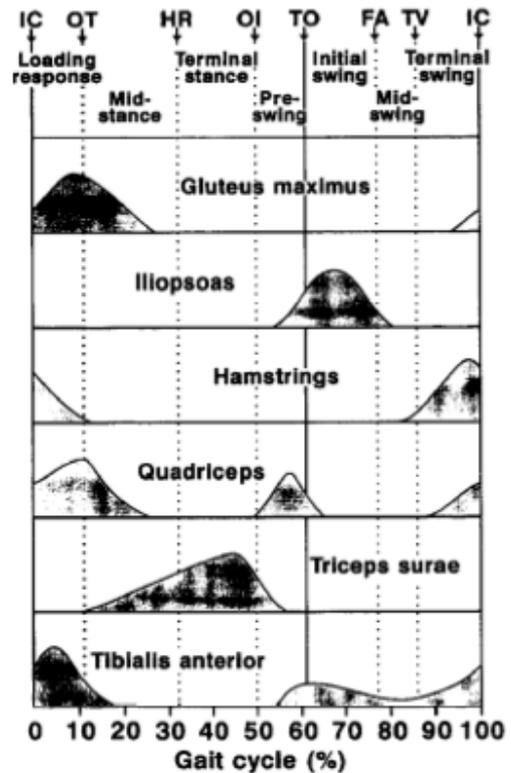


Fig. 5. [6] Actividad electromiográfica de distintos músculos durante el ciclo de la marcha.

seguimiento de post operatorios de problemas relacionados a la locomoción del humano, etc. En el campo de los deportes de competencia, el conocimiento del funcionamiento del sistema locomotor permite desarrollar nuevas técnicas de entrenamiento para la superación del deportista. Finalmente en el área de la ingeniería y la investigación, el estudio de la marcha da lugar a la creación de infinitos modelos para todos los fenómenos que se pueden observar. Además, con el avance del tiempo los ingenieros tienen día a día el desafío de aprovechar las nuevas tecnologías para realizar instrumentos más precisos, menos costosos y más fáciles de usar, y este es un gran ámbito en donde hacerlo.

REFERENCES

- [1] Sina Ameli, Fazel Naghdy, David Stirling, Golshah Naghdy, and Morteza Aghmesheh. Objective clinical gait analysis using inertial sensors and six minute walking test. *Pattern Recognition*, 63(August 2016):246–257, 2017.
- [2] Aurelio Cappozzo, Ugo Della Croce, Alberto Leardini, and Lorenzo Chiari. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 1: Theoretical background. *Gait and Posture*, 21(2):186–196, 2005.
- [3] A. L. Hof, H. Elzinga, W. Grimmius, and J. P K Halbertsma. Detection of non-standard EMG profiles in walking. *Gait and Posture*, 21(2):171–177, 2005.
- [4] Núria Massó i Ortigosa, Ferran Rey, Daniel Romero Rodríguez, Gabriel Gual, Lluís Costa Tutusaus, and Ana Germán. Aplicaciones de la electromiografía de superficie en el deporte. *Apunts: Medicina de l'esport*, 45(166):127–136, 2010.
- [5] Adriana Villa Moreno. Electromiografía Y Dinamometría. *Revista Ingeniería Biomédica*, 2(3):16–26, 2008.
- [6] Weijun Tao, Tao Liu, Rencheng Zheng, and Hutian Feng. Gait analysis using wearable sensors. *Sensors*, 12(2):2255–2283, 2012.
- [7] C L Vaughan, Brian L Davis, and Jeremy C O'Connor. *The Three-Dimensional and Cyclic Nature of Gait*. 1999.
- [8] Michael W. Whittle. Clinical gait analysis: A review. *Human Movement Science*, 15(3):369–387, 1996.