

LABORATORIO DE MARCHA Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTO PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES CLÍNICAS

Bioingeniero Marcos Crespo

COORDINADOR DEL LABORATORIO DE MARCHA Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTO. FLENI.

SEDE ESCOBAR. RUTA 9 KM 52,5 – ESCOBAR, BUENOS AIRES. EMAIL: marcha@fleni.org.ar

RESUMEN

El análisis clínico del movimiento es una herramienta de diagnóstico de marcada utilidad en el campo de las patologías neuromotoras. La posibilidad de evaluar un gesto motor disfuncional por medio de un estudio cuantitativo que involucre las variables biomecánicas que lo conforman, permite comprender la naturaleza del mismo y elaborar con objetividad un plan de tratamiento. La presente revisión ofrece un recorrido por algunos de los conceptos básicos involucrados en el análisis de movimiento como la cinemática, la cinética y la electromiografía dinámica, bloques de evaluación comunes a la mayor parte de los laboratorios. También se describe cómo son evaluadas y utilizadas estas variables en el análisis clínico de la marcha, la aplicación mayormente estudiada y difundida en los últimos años. Finalmente, se mencionan algunas otras aplicaciones de esta tecnología además del estudio de la marcha, mostrando la utilidad del laboratorio de marcha y el análisis de movimiento en el diagnóstico y tratamiento de patologías neuromotoras, tanto como en el aprendizaje y comprensión de patrones de movimiento característicos.

Palabras clave: Análisis de movimiento, cinemática, cinética, electromiografía

ABSTRACT

Clinical motion analysis is a strong diagnostic tool useful in the field of neuromotor pathologies. The ability to evaluate a dysfunctional motor gesture by a quantitative study involving biomechanical variables allows understanding its nature and helps to develop an objective plan of treatment. This review provides a tour of some of the basic concepts involved in the motion analysis as kinematics, kinetics and dynamic electromyography, common to most laboratories around the world. Also, describes how these variables are evaluated and used in the clinical gait analysis, the most studied and widespread application in recent years. Finally, some others applications of this technology besides gait analysis are mentioned, showing the usefulness of the gait and motion analysis laboratory in the diagnosis and treatment of neuromotor disorders, as well as in learning and understanding characteristic movement patterns.

Key words: Motion analysis, kinematics, kinetics, electromyography

INTRODUCCIÓN

El análisis clínico de movimiento es una herramienta de diagnóstico cada vez más aceptada en el área de la medicina, en el estudio de disfun-

ciones neuromotoras. Es utilizado para evaluar de forma cuantitativa la *performance* de un paciente en la realización de un determinado gesto motor con la finalidad de reportar la función y valorar los resultados de los tratamientos. Mediante el entendimiento de los conceptos básicos del movimiento humano, médicos y terapeutas pueden optimizar el tratamiento y la rehabilitación de sus pacientes, así como evaluar terapias y equipamientos.

Desde el punto de vista tecnológico puede definirse al laboratorio de marcha y el análisis de movimiento como un sistema multifactorial integrado que comprende básicamente tres bloques principales: Un sistema tridimensional de captura de movimiento (cinemática), un sistema para la medición de fuerzas, momentos de fuerza y potencias involucradas en el movimiento (cinética) y un sistema de registro de la actividad de contracción relacionada a músculos individuales o grupos musculares (Electromiografía dinámica).

Muchas son las aplicaciones del análisis de movimiento en la actualidad. En la aplicación clínica, el laboratorio de marcha y análisis de movimiento ha encontrado mayor utilidad en el diagnóstico y tratamiento de las disfunciones de la marcha, no obstante, es utilizado en diferentes áreas como en el estudio de disfunciones de miembro superior, postura y balance, medicina laboral y deportiva.

El objetivo de este artículo es repasar los conceptos básicos relacionados con el laboratorio de marcha y análisis de movimiento, presentando su utilidad clínica, aplicaciones y alcances. La presentación enfatiza en la utilización del laboratorio para el análisis clínico de la marcha por ser la aplicación más estudiada y difundida en la actualidad, aún así, mediante la utilización de los mismos conceptos pueden evaluarse diferentes gestos motores.

LABORATORIO DE MARCHA Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTO

Debe entenderse al laboratorio de marcha y análisis de movimiento como una herramienta de medición. La posibilidad de cuantificar lo que vemos en un gesto motor, permite comprenderlo y

describir las posibles causas de comportamientos disfuncionales en el movimiento.

Más allá de que un examen clínico del paciente y un análisis observacional del movimiento puedan ayudar a percibir anomalías, el análisis tridimensional combinado con el estudio de las fuerzas y la actividad muscular, permite comprender y profundizar sobre las posibles causas de un movimiento patológico.

El laboratorio de marcha y análisis de movimiento ofrece esta posibilidad a través de la evaluación cuantitativa de gestos que involucran desplazamientos y rotaciones en los tres planos del espacio. El enfoque global del análisis se logra mediante la conjunción de tres bloques fundamentales en un laboratorio: la cinemática, la cinética y la electromiografía dinámica.

Otros sistemas de medición como la baropodometría y la evaluación del consumo energético suelen utilizarse para el estudio de la marcha y el movimiento pero no serán detallados en esta presentación.

CINEMÁTICA

La cinemática es el estudio del movimiento sin importar las causas que lo generan. En el análisis de movimiento, la cinemática provee información específica acerca de la orientación y los movimientos relativos de los segmentos y las articulaciones en el espacio tridimensional.

Para poder cuantificar estas variables, se utiliza un sistema de captura de movimiento conformado por un conjunto de cámaras infrarrojas de alta velocidad y marcadores reflectivos adheridos a la piel del paciente. Una adecuada colocación de los marcadores sobre estructuras óseas fácilmente palpables, permite reconstruir un modelo tridimensional de los segmentos del cuerpo, y como resultado de este modelo, obtener las curvas de movimiento. (Figura 1)

Mediante este concepto, desarrollando el modelo biomecánico adecuado, es posible reconstruir una gran variedad de gestos motores y extraer variables de interés para la evaluación del paciente. Las variables lineales que se desprenden del mo-

vimiento de los segmentos son también consideradas dentro de la cinemática. Así es que pueden evaluarse: velocidad, cadencia, largo y ancho de paso, tiempo para realizar una tarea, entre otros.

En el análisis clínico de la marcha, la cinemática nos da información acerca del rango de movimiento dinámico del tronco, la pelvis y de cada una de las tres principales articulaciones de los miembros inferiores (cadera, rodilla y tobillo) de forma bilateral y en los tres planos del espacio (sagital, coronal y transversal) a lo largo del ciclo de la marcha.

Por su carácter cuantitativo, la información obtenida puede ser fácilmente comparada con patrones normales de edades específicas, o bajo diferentes condiciones de marcha (descalzo, con equipamiento ortésico, con bastones, etc.). También puede compararse con evaluaciones anteriores de un mismo paciente para evaluar los resultados de un tratamiento o hacer un seguimiento de la evolución a largo plazo. La propiedad de tridimensionalidad es de suma utilidad al evaluar rotaciones dinámicas, difíciles de detectar en un análisis observacional.

CINÉTICA

La cinética es el estudio de las fuerzas que generan el movimiento. Para determinar la cinética del movimiento se utilizan las propiedades inerciales de los segmentos del cuerpo, como su

masa y momento de inercia además de las fuerzas que actúan sobre estos. El principal factor externo asociado al análisis de la marcha y la postura, es la fuerza de reacción del suelo. Esta magnitud se mide utilizando plataformas de fuerza. Cuando el paciente apoya el pie en una de las plataformas insertas en el piso del laboratorio, ésta nos da información de la fuerza de reacción y el punto de aplicación de la misma.

Tanto la fuerza de reacción del suelo como la trayectoria del centro de presión son utilizadas en el estudio de la marcha. La combinación matemática de estas variables con los parámetros obtenidos de la cinemática y la antropometría del sujeto evaluado, permiten calcular los momentos y las potencias asociados con el movimiento. (Figura 2)

De este modo, ante la ejecución de un movimiento es posible determinar el efecto de las fuerzas musculares y de tejidos blandos actuando sobre los centros de rotación de las articulaciones a través de brazos de palanca (estructuras óseas). Comúnmente, la cinética es reportada como la respuesta interna a los fenómenos externos e involucra fuerzas musculares, tensión de elongación de los tendones, contracturas, etc.

Asociando el momento de fuerza y el movimiento de la articulación puede determinarse la generación o absorción de potencia en función de la presencia de contracciones musculares concéntricas o excéntricas. Mediante estos parámetros se puede discriminar, entre otras cosas, si los valores de momento son debido a fuerzas ineficientes

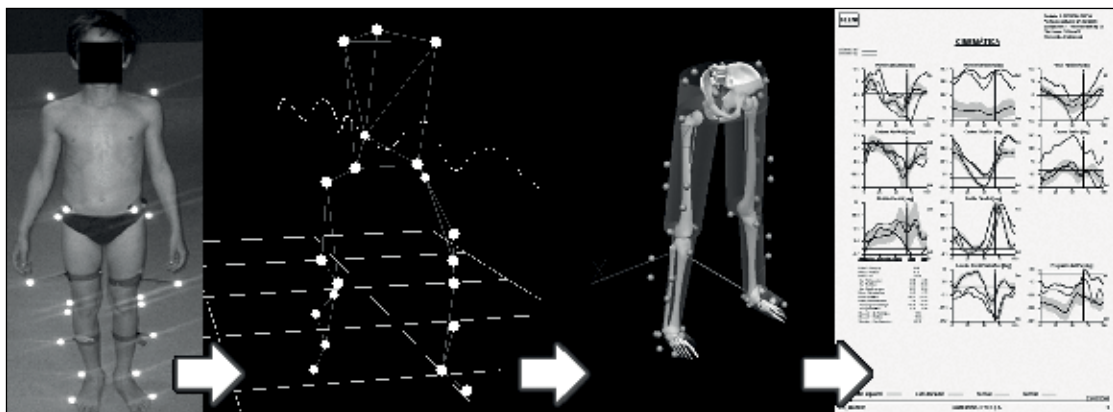


Figura 1: Cinemática. Se observa de izquierda a derecha la instrumentación del paciente con los marcadores, la captura de la trayectoria de los marcadores durante el movimiento, la elaboración del modelo biomecánico y las curvas de movimiento

o a disfunciones de los brazos de palanca y si los desvíos en los patrones de generación y absorción de potencia derivan de momentos de fuerza deficientes o rango de movimiento inadecuado de las articulaciones.

ELECTROMIOGRAFÍA DINÁMICA

La electromiografía dinámica (EMG) describe la actividad eléctrica medida durante el movimiento, ya sea sobre la piel o mediante la utilización de electrodos intramusculares. Es una indicadora de activación de las unidades motoras y provee información relacionada a la función muscular.

Puede registrarse esta señal mediante el uso de electromiógrafos de uso clínico. Debe tenerse en cuenta la portabilidad del sistema de adquisición para asegurar la comodidad del paciente durante la ejecución de la tarea. (Figura 3)

En el estudio de la marcha y el movimiento la importancia de la electromiografía dinámica radica en poder determinar los tiempos de activación muscular durante el gesto motor, evidencias de espasticidad u otros tipos de hipertonía, evidencias de control motor selectivo y coordinación muscular e información de músculos individuales.

La EMG puede utilizarse también para evidenciar fatiga muscular o índices relacionados a la amplitud de la señal, como la contracción voluntaria máxima o el porcentaje de activación muscular para una determinada tarea.

UTILIDAD Y APLICACIONES

El análisis del movimiento ha hecho su aporte más importante en el tratamiento de los problemas asociados a la marcha, tanto en la comprensión de la biomecánica de la marcha normal ⁽¹⁾ como en la caracterización de patrones patológicos en individuos con desordenes neuromusculares ^(2,3).

En el diagnóstico y tratamiento de disfunciones de la marcha en pacientes con encefalopatía crónica no evolutiva, la aplicación del análisis de movimiento ha demostrado el rol de las disfunciones de brazo de palanca en la marcha patológica y los beneficios de corregirlas adecuadamente ^(4, 5). Ha permitido evaluar el reemplazo de procedimientos quirúrgicos injuriosos por otros con mejores resultados. Comparaciones pre y post tratamiento han confirmado la efectividad de nuevas terapias de tratamiento del tono muscular como la rizotomía dorsal selectiva y las cirugías multinivel, las cuales abarcan la corrección simultánea de todas las deformidades óseas del crecimiento ⁽⁶⁾. El análisis clínico de la marcha ha demostrado ser sustancial en la decisión del tratamiento a seguir en el manejo de niños con parálisis cerebral ⁽⁷⁾.

En patrones de marcha asociados a patologías neurológicas del adulto, el laboratorio de marcha y análisis de movimiento ofrece una importante aplicación a la descripción de patrones disfuncionales y al reconocimiento de indicadores de evolución para una determinada patología ^(8, 9, 10). Un gran número de aportes se han realizado principalmente en pacientes con enfermedad de Parkinson, tanto en la descripción de los parámetros característicos ⁽¹¹⁾, la evaluación de los tratamientos ⁽¹²⁾, e incluso en el comportamiento de parámetros

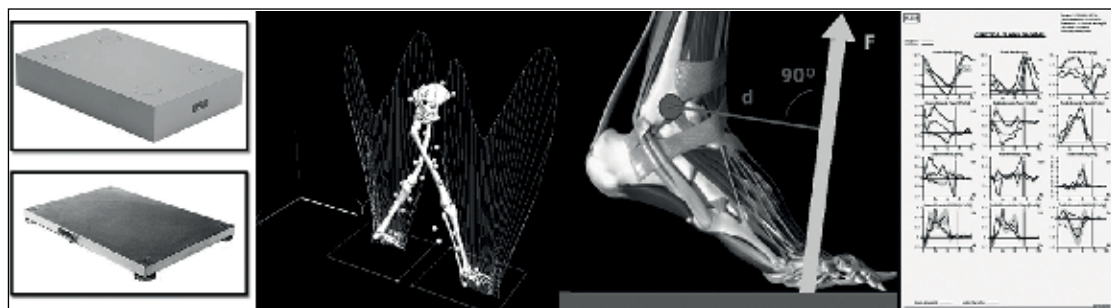


Figura 2: Cinética. La figura muestra desde la izquierda: dos modelos de plataformas de fuerza, la adquisición del vector de fuerza de reacción del piso durante la marcha, el cálculo del momento ($M = F \times d$) y las curvas de cinética presentadas en un reporte estándar.

más complejos como la dinámica del desplazamiento del centro de masa y el centro de presión durante la marcha ⁽¹³⁾. Muchos grupos de estudio se encuentran abocados a la tarea de identificar los patrones e indicadores que permitan diferenciar las patologías neurológicas del adulto y los estados de evolución, a través de las potencialidades que ofrece el análisis de movimiento

También en el tratamiento de las secuelas de traumatismo craneoencefálico, el análisis de la marcha ha demostrado su utilidad. Cuando un paciente es intervenido quirúrgicamente con el fin de optimizar su marcha, el análisis de movimiento puede ayudar a distinguir anomalías del tono muscular o determinar movimientos anormales primarios asociados a la lesión y los movimientos secundarios o compensatorios ⁽¹⁴⁾

Además de su utilidad para cuantificar el estado y la función de un paciente, el análisis de movimiento permite evaluar de manera precisa el equipamiento ortésico y de asistencia a la marcha, tanto para determinar su funcionamiento como para lograr nuevos y mejores diseños ⁽¹⁵⁾.

También en la evaluación de las extremidades superiores, el análisis de movimiento, ha demostrado utilidad a la hora de cuantificar parámetros en tareas relacionadas al tren superior. Muchos trabajos lo han aplicado a la evaluación de actividades de la vida diaria, como tareas de alcance y transporte de objetos ^(16, 17, 18), valiéndose del análisis de movimiento como una herramienta objetiva para evaluar la función ⁽¹⁹⁾ y cuantificar los resultados de un tratamiento. ⁽²⁰⁾

El estudio del balance y equilibrio, las evalua-

ciones de columna lumbar durante tareas de carga y análisis de gestos deportivos son otros de los usos más comunes de esta tecnología. Dada la flexibilidad que ofrece el análisis de movimiento en la elaboración de los protocolos de evaluación y modelos biomecánicos, su aplicación se hace extensiva a un gran número de gestos motores. Con base en un trabajo interdisciplinario y profesionales capacitados para la interpretación de los resultados de los estudios, el análisis clínico de la marcha y el movimiento se convierte en una herramienta diagnóstica de gran potencial.

CONCLUSIONES

Se han descrito los bloques principales de un laboratorio de marcha y análisis de movimiento y el aporte que estos brindan en materia de información a la hora de evaluar un paciente.

Los avances tecnológicos en el área de la animación tridimensional y el continuo desarrollo de modelos biomecánicos cada vez más precisos, han generado un crecimiento en el campo de aplicación del análisis de movimiento. Gestos motores más complejos y diferentes estructuras músculo esqueléticas pueden evaluarse con mayor precisión a medida que estos avances llegan al área de aplicación clínica. Esto permite a los profesionales de la salud contar con datos más confiables y mayor cantidad de variables para interpretar el estado y la función de sus pacientes.

La integración de las variables cinemáticas y cinéticas en el campo tridimensional, sumado a la electromiografía dinámica, permite un en-



Figura 3: Electromiografía dinámica: La figura muestra un modelo de electromiógrafo portátil, diferentes tipos de electrodos (de superficie e intramusculares) y la señal electromiográfica presentada en un reporte.

foque más completo del paciente facilitando la comprensión de la biomecánica del movimiento evaluado.

Más allá de las virtudes de esta tecnología debe concebirse al análisis clínico de movimiento como una herramienta de medición dentro de una batería de herramientas disponibles. Complementos como imágenes radiográficas, video y fotografía digital, escalas de evaluación clínica, suelen utilizarse para obtener más información de la situación del paciente.

Una de las principales ventajas del análisis de la marcha y el movimiento radica en la centralización de la información y su permanencia en

el tiempo. La posibilidad de cuantificar el movimiento, realizar comparaciones pre y post tratamiento y evaluaciones de evolución utilizando la misma metodología de medición, aporta objetividad al seguimiento del paciente y permite planificar su tratamiento con objetivos reales.

El futuro del análisis de movimiento es muy amplio en lo que respecta a sus aplicaciones, la precisión que se ha logrado en la recolección de datos y el desarrollo de los modelos biomecánicos han llegado a un punto muy alto y continúan en crecimiento, lo que hace de esta tecnología una herramienta de mucha utilidad en el diagnóstico de las disfunciones neuromotoras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sutherland D. The Development of Mature Gait, Gait and Posture. 1997; 6: 163-170.
2. Bell K, Ounpuu S, DeLuca P, et al. Natural progression of Gait with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop.* 2002; 22: 677-682.
3. Moen T, Gryfakis N, Dias L, et al. Crouched Gait in Myelomeningocele. A Comparison Between the Degree of Knee Flexion Contracture in the Clinical Examination and During Gait. *J Pediatr Orthop* 2005; 25:657-660.
4. Gage J, Gait analysis in cerebral palsy. London: Mac Keith Press. 1991; P 101-17.
5. Gage J, Novacheck T. An update of treatment of gait problems in cerebral palsy. *J Pediatr Orthop* 10: 265-74.
6. Gage J, Schwartz M, Koop S, et al. The identification and treatment of gait problems in cerebral palsy. Mack Keith Press. 2009; 260-284.
7. Cook R, Schneider I, et al. Gait Analysis Alters Decision-Making in Cerebral Palsy. *J Pediatr Orthop* 2003; 23:292-295.
8. Mitoma H, Hayashi R, Yanagisawa N, et al. Characteristics of parkinsonian and ataxic gaits: a study using surface electromyograms, angular displacements and floor reaction forces. *J Neurol Sci.* 2000;174:22-39.
9. Morris M, McGinley J, Huxhan F, et al. Constraints on the kinetic, kinematic and spatiotemporal parameters of gait in Parkinson's disease. *Hum Mov Sci.* 1999;18: 461-468.
10. Delval A, Krystkowiak P, et al. A biomechanical study of gait initiation in Huntington's disease. *Gait Posture.* 2007 Feb;25(2):279-88. Epub 2006 Jul 3.
11. Mirek E, Rudzińska M, Szczudlik A. The assessment of gait disorders in patients with Parkinson's disease using the three-dimensional motion analysis system Vicon. *Neurol Neurochir Pol.* 2007; 41(2):128-33.
12. Svehlík M, Zwick EB, et al. Gait analysis in patients with Parkinson's disease off dopaminergic therapy *Arch Phys Med Rehabil.* 2009; 90 (11):1880-6.
13. Merello M, Fantacone N, Balej J. Kinematic study of whole body center of mass position during gait in Parkinson's disease patients with and without festination. *Mov Disord.* 2010 Apr 30;25(6):739-46.
14. Perry J. The use of gait analysis for surgical recommendations in traumatic brain injury. *Head Trauma Rehabil, Volume 14(2).* April 1999.116-135.
15. White H, Jenkis J, Neace W, Tylkowski C, et al. Clinically prescribed orthoses demonstrate an increase in velocity of gait in children with

cerebral palsy: a retrospective study. *Dev Med Child Neurol*; 44: 227-32.

16. Tyler AE, Karst GM. Timing of muscle activity during reaching while standing: systematic changes with target distance. *Gait Post* 2004, 20: 126–133.

17. Cirstea MC, Levin MF. Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain* 2000; 123: 940-953.

18. Chang JJ, Wu TI, Wu WL, et al. Kinematical measure for spastic reaching in children with cerebral palsy. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2005 May;20(4):381-8. Epub 2005 Jan 19.

19. Gronley JK, Newsam CJ, Mulroy SJ, et al. Electromyographic and kinematic analysis of the shoulder during four activities of daily living in men with C6 tetraplegia. *J Rehabil Res Dev*. 2000 Jul-Aug; 37(4):423-32.

20. Fridman E, Crespo M, Gomez Argüello S, et al. Kinematic improvement following Botulinum Toxin-A injection in upper-limb spasticity due to stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2010; 81:423-7.