

## ANÁLISIS CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL: ASPECTOS METODOLÓGICOS

Bermejo, J. <sup>1</sup>; Palao, J. M. <sup>2</sup>; López-Elvira, J. L. <sup>3</sup>

1. Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte
2. Departamento de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Universidad de Murcia
3. Departamento de Psicología de la Salud. Universidad Miguel Hernández de Elche

---

### RESUMEN

El presente trabajo revisa los aspectos teóricos y las consideraciones metodológicas a tener en cuenta cuando se realiza un análisis del movimiento en el ámbito deportivo mediante fotogrametría tridimensional. Las consideraciones abordadas se agrupan en: 1) sistema de registro, 2) características de las cámaras, 3) número y ubicación de las cámaras, 4) determinación del sistema de referencia, 5) determinación del nivel de extrapolación, 6) sincronización de las imágenes, 7) representación del deportista, 8) digitalización, 9) determinación de los centros de masas de los segmentos y del cuerpo, y 10) validez, fiabilidad y objetividad de análisis 3D. El documento aporta información sobre los protocolos para realizar un análisis biomecánico de la técnica deportiva desde la perspectiva de la cinemática.

**Palabras clave:** biomecánica, cinemática, técnica, deporte.

### ABSTRACT

This paper describes theoretical aspects and the most important methodological considerations to be taken into account when applying 3D photogrammetry to motion analysis in sport. Considerations can be grouped into the following: 1) recording system, 2) camera features, 3) number and location of the cameras, 4) determining the reference system, 5) determining the level of extrapolation, 6) synchronization of images, 7) athlete representation, 8) digitization, 9) determining segmental and body center of mass, and 10) validity, reliability and objectivity of 3D analysis. The aim of this paper is to provide accurate and scientifically-based information to researchers, enabling them to address the kinematic analysis of sports technique.

**Key Words:** biomechanics, kinematics, technique, sport.

---

### *Correspondencia:*

Javier Bermejo Frutos  
Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte  
Calle Progreso 36 B, 30500 Molina de Segura, Murcia  
javier\_bermejo\_frutos@hotmail.com  
Fecha de recepción: 15/05/2012  
Fecha de aceptación: 05/12/2012

## INTRODUCCIÓN

La fotogrametría tridimensional (3D) es una metodología de análisis del movimiento válida, fiable y que está muy extendida en el ámbito de la biomecánica aplicada al estudio de la técnica deportiva (Pearsall y Reid, 1994). Esta metodología se basa en el análisis de las imágenes o fotogramas procedentes de varias grabaciones de vídeo sincronizadas en el tiempo, que registran un mismo movimiento o acción técnica desde diferentes puntos de vista. A través de un procedimiento matemático validado, estandarizado y automatizado denominado DLT («Direct Linear Transformation» o transformación lineal directa) se establecen las coordenadas 3D de posicionamiento del deportista (Abdel-Aziz y Karara, 1971; Wolf, 1983). Para ello, es necesario determinar las coordenadas que definen los puntos del deportista en los fotogramas, que se fijan en un procedimiento conocido con el nombre de digitalización (Abdel-Aziz y Karara, 1971) y que permite determinar la ubicación del centro de masas (CM) a partir de los parámetros de modelado y las coordenadas. A partir de esta información se pueden calcular registros de posición (ubicación del centro de masas global-específico o ubicación de un segmento determinado), registros espacio-temporales (duraciones, distancias, velocidades, o aceleraciones) y registros de ángulos (inclinaciones corporales o rangos de movimiento de las articulaciones) mediante el procesamiento de las coordenadas.

Al observar los fotogramas procedentes de grabaciones de vídeo lo que se ve es la proyección de un objeto 3D (el deportista) sobre un plano bidimensional (2D). La imagen observada no representa la proyección de los puntos reales 3D del objeto filmado en un plano, sino que se trata de una recta que va desde la lente de la cámara hasta el objeto (Allard, Blanchi y Aissaoui, 1997). Por tanto, para conocer los datos de posición en el tiempo es necesario realizar un procedimiento de reconstrucción del movimiento. En este procedimiento de reconstrucción del movimiento se identifican dos fases: a) transformación de las coordenadas reales a coordenadas planas y b) transformación de las coordenadas 2D a coordenadas 3D (Abdel-Aziz y Karara, 1971). La primera fase implica la grabación de la acción técnica, grabación del marco de calibración y análisis de la imagen en el laboratorio (edición de los vídeos, sincronización de las imágenes y digitalización). La segunda fase implica el procesamiento de las coordenadas en el programa de análisis, corrección de los errores sistemáticos y aleatorios, ajuste de la señal-ruido, reconstrucción del movimiento (aplicación del algoritmo DLT) y determinación de las variables de estudio.

## ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA FOTOGRAMETRÍA 3D

Seguidamente se describen los aspectos metodológicos más importantes del procedimiento para la reconstrucción del movimiento deportivo. La estructuración de los

apartados se basa en la que siguen algunos trabajos sobre biomecánica y que analizan el uso del vídeo en el análisis del movimiento (Bartlett, 2007; Grimshaw y Burden, 2007; Payton y Bartlett, 2008): sistema de registro, características de las cámaras, número y ubicación de las cámaras, determinación del sistema de referencias, sincronización de las imágenes, representación del deportista, digitalización, determinación de los centros de masas y el centro de gravedad, y validez, fiabilidad y objetividad del análisis 3D.

### *Sistema de registro*

La técnica fotogramétrica permite la utilización de fotografía, cine, o vídeo. Estos sistemas de registro del movimiento permiten obtener secuencias de imágenes para su análisis posterior en el laboratorio sin la necesidad de interferir en la acción. Este aspecto resulta determinante cuando se trata de obtener parámetros reales en situaciones de competición oficial o durante los entrenamientos. El análisis del movimiento en situaciones de campo, en relación al análisis en situaciones de laboratorio, ofrece condiciones ambientales menos estables, el tiempo de procesamiento de los datos es mayor y la precisión de los resultados es menor. Sin embargo, no interfiere en el deportista, requiere un menor coste de materiales utilizados, se puede llevar a cabo ante una mayor cantidad de situaciones deportivas, permite aportar feedback visual, y el nivel de aplicabilidad de los resultados obtenidos es mayor.

El sistema de registro de fotografía es el sistema que aporta una mayor calidad junto con el cine. Esto se debe al tipo de lente que utilizan estos aparatos. Sin embargo, no es un sistema de captación muy extendido en las técnicas fotogramétricas de análisis del movimiento, ya que normalmente interesan secuencias de imágenes de larga duración que en una fotografía o a través del ojo humano no se pueden recoger (Pérez y Llana, 2007).

El sistema de registro «cine» es el sistema que presenta mayor resolución temporal (Angulo y Dapena, 1992). Dentro de este sistema de registro existen tres opciones: a) super 8 (4.2 x 5.7 mm), con una capacidad de registro de 250 Hz; b) cine 16 mm (7.5 x 10.3 mm), con una capacidad de registro de 500 Hz; y c) cine 32 mm (18 x 24 mm), con una capacidad de registro de 500 Hz (Pérez y Llana, 2007). A pesar de esta ventaja en cuanto a calidad de imágenes de este sistema de registro, presenta dos características que limitan su uso como sistema de registro en el ámbito deportivo (fotogrametría 3D): a) el visionado de la filmación se encuentra condicionado por el espacio de tiempo que transcurre desde que se graba el movimiento hasta que se obtiene el revelado de la cinta (puede llegar a tardar hasta más de dos semanas); y b) a diferencia del vídeo doméstico o digital, las cintas no pueden ser reutilizadas (Nelson y Miller, 1986).

El sistema de registro «vídeo» es el sistema más extendido en la actualidad (Gruen, 1997). El vídeo analógico (que utiliza impulsos electromagnéticos para grabar en una cinta magnética y que apenas se utiliza en la actualidad) ha dejado paso al vídeo digital (grabación mediante lenguaje binario en disco duro o CD). Con este sistema se obtiene una mayor resolución y no se pierde calidad de imagen al realizar copias. Sus principales ventajas son: a) permite la visualización inmediata (Ángulo y Dapena, 1992); b) tiene un bajo coste económico (Nelson y Miller, 1986); c) una vez obtenidos los vídeos se pueden procesar rápidamente en el ordenador para su tratamiento; y d) es una técnica accesible para los entrenadores y los investigadores. En comparación con el cine, tiene una menor capacidad para registrar imágenes por unidad de tiempo. Para las cámaras domésticas esta frecuencia de muestreo es de 25-30 Hz, mientras que para las cámaras digitales es de 30-60 Hz (Pérez y Llana, 2007). Este aspecto supone una limitación importante a la hora de medir tiempos. Considerando un error asumible como el 2% de la medida, a 50 Hz no se podrían medir con suficiente exactitud tiempos menores a 1 segundo. Sin embargo, el desarrollo tecnológico permite actualmente que algunas de estas cámaras digitales lleguen a captar hasta 1500 Hz, aunque esto no es lo normal en los estudios biomecánicos.

Aunque la calidad del cine es mayor respecto al vídeo (Pérez y Llana, 2007), los estudios de Kennedy, Wright y Smith (1989) y Ángulo y Dapena (1992) revelan que la captura del movimiento a través de vídeo es válida y precisa. Estos estudios se basan en la digitalización repetida de varios digitalizadores sobre un marco de calibración. Las diferencias de registro entre ambos sistemas no representan variaciones estadísticamente significativas en el error de reconstrucción del movimiento. Por otra parte, los sistemas de vídeo de alta calidad actuales hacen que las diferencias en calidad de imagen entre cine y vídeo sean mínimas. Además, el vídeo es más económico, supone menor espacio de almacenamiento, permite su utilización en cualquier ámbito (indoor y outdoor) y aporta feedback visual inmediato respecto al cine (Payton y Bartlett, 2008).

#### *Características de las cámaras de vídeo*

Las características de las cámaras son importantes a la hora de asegurar el posterior análisis del movimiento. Por ello, en el presente apartado, para entender mejor todas las combinaciones tecnológicas de las cámaras, se divide en: a) captación de la imagen, b) sistema de codificación y transmisión, c) calidad de la imagen y tamaño del píxel, d) frecuencia de muestreo, e) tiempo de obturación, y f) sistema de compresión (codecs).

## 1. Captación de la imagen

Las cámaras transforman las imágenes en señales eléctricas. La captación de fotogramas que forman la imagen de vídeo digital se realiza a través de un sensor denominado CCD («Charge Coupled Device» o dispositivo de carga acoplada) o en la actualidad el más frecuente CMOS («Complementary Metal Oxide Semiconductor» o semiconductor complementario de metal óxido). Se trata de un circuito que contiene condensadores enlazados sensibles a la luz. A través de un circuito interno, cada condensador transfiere su carga eléctrica del registro realizado (Payton y Bartlett, 2008). Este procedimiento es el que permite que la imagen pueda ser procesada y almacenada en la memoria. La captación de imágenes por parte del sensor se produce en líneas de información denominadas «líneas pares» y «líneas impares». Estas líneas se entrelazan dando lugar a la imagen resultante. Sin embargo, al realizar el visionado de las grabaciones en un reproductor de vídeo pueden aparecer imágenes movidas, sobre todo en movimientos rápidos. Para evitar esto, se deben separar las líneas pares e impares a través de un procedimiento denominado «desentrelazado». El desentrelazado es un procedimiento que realizan de forma automática la mayoría de softwares para el tratamiento de la imagen digital. La realización correcta del desentrelazado de la imagen se aprecia en la reproducción posterior del vídeo, pudiendo observar en la parte superior del mismo unas líneas blancas y negras verticales que aparecen de forma alternada en los fotogramas. En la actualidad algunas cámaras de vídeo realizan la grabación de las imágenes de forma progresiva («profesive scanning») en lugar de entrelazada («interlaced scanning»), con lo que cada imagen está formada por la totalidad de líneas pares e impares y no se hace necesario su desentrelazado.

## 2. Sistema de codificación y transmisión

Es necesario conocer el sistema de codificación que emplea la cámara, ya que se debe especificar en los programas de edición de vídeo digital previamente al tratamiento de la imagen. Algunos modelos de cámaras permiten cambiar el tipo de sistema de codificación. Sin embargo, en otros casos este aspecto viene condicionado por el lugar donde se ha fabricado la videocámara (zona geográfica). En Estados Unidos y la mayor parte de América y Japón este sistema se denomina NTSC («National Television System Committee» o Comisión Nacional de Sistema de Televisión) y tiene una frecuencia de muestreo especificada de 29.97 Hz. En el sistema Europeo se utiliza un derivado de NTSC denominado PAL («Phase Alternating Line» o Línea de Fase Alternada), cuya frecuencia establecida es de 25 Hz (Calvert y Buderlin, 1995). Esta frecuencia de 25 Hz es la misma que para el sistema SECAM («Séquentiel Couleur à Mémoire» o Color Secuencia con Memoria) que se utiliza en Francia, este de Europa y algunos países de África.

### 3. Calidad de la imagen y tamaño del píxel

Un factor determinante en la exactitud de la reconstrucción 3D a partir de grabaciones de vídeo procedentes de varias cámaras es la calidad de la imagen y el tamaño del píxel (Kerwin y Twigg, 1998). Este aspecto determina la resolución, que se expresa en píxeles. La resolución de una imagen depende del número de células fotosensibles del sensor, de la cantidad de píxeles y del tamaño de los píxeles. A mayor cantidad de píxeles mayor resolución de la imagen. A continuación se expone una tabla con las principales resoluciones, estándar y número de píxeles (tabla 1):

TABLA 1  
 Datos sobre la calidad de la imagen, estándar y número de píxeles.  
 En la resolución se indica el largo x alto.

Resolución	Estándar	Tamaño de imagen
320 x 240	QVGA	77 Kilopíxeles
640 x 480	VGA	307 Kilopíxeles
720 x 360	Apple Lisa	259 Kilopíxeles
720 x 576	DV PAL	414 Kilopíxeles
800 x 600	SVGA	480 Kilopíxeles
850 x 480	WVGA	409 Kilopíxeles
1024 x 768	XGA	786 Kilopíxeles
1280 x 1024	SXGA	1300 Kilopíxeles
1920 x 1080	HD 1080	1451 Kilopíxeles

Un aspecto interesante sobre este punto es cómo conocer la distancia mínima que detecta cada píxel. Para calcularlo, primero se debe conocer el tipo de cámara utilizada y su resolución. El segundo aspecto que se debe conocer es la medida que abarca el plano de grabación de la cámara de lado a lado. Por ejemplo, para cámaras convencionales que no son HD y tienen una resolución de 720 x 576 píxeles grabando una acción de la que se abarca una distancia de lado a lado de 10 m, lo que se hace es dividir la distancia lateral (10 m) entre la resolución (720 píxeles). El resultado es una medida de 0.013 m, que es lo que ocupa cada píxel. Esto quiere decir que no sería posible ver objetos de dimensiones más pequeñas a esas medidas.

### 4. Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo de la cámara de vídeo (capacidad de registrar imágenes por unidad de tiempo) y que a nivel global puede ser baja ( $d > 60$  Hz), media (100-500 Hz) o alta ( $> 500$  Hz), depende de la actividad que se pretenda analizar. Esta frecuencia óptima (frecuencia de muestreo necesaria para analizar movimientos a diferente velocidad) varía en función de si se trata de movimientos lentos, actividades moderadas, o movimientos rápidos. A continuación se expone una tabla resumen (tabla 2) a partir de la propuesta realizada por Payton y Bartlett (2008).

TABLA 2  
 Tipo de actividad y frecuencia de muestreo óptima (Payton y Bartlett, 2008).

Actividad	Frecuencia de muestreo (Hz)
Caminar, nadar, subir escaleras	25 - 500
Correr, lanzamiento de peso, salto de altura	50 - 100
Carreras de velocidad, lanzamiento de jabalina, chut en fútbol	100 - 200
Servicio en tenis, swing en golf, estocada en esgrima	200 - 500

### 5. Tiempo de obturación

El tiempo de obturación hace referencia al tiempo durante el cual el obturador de la cámara (dispositivo que controla el tiempo durante el que llega la luz al dispositivo fotosensible) permanece abierto para que el sensor de la cámara capte la luz del lugar donde se realiza el movimiento (tiempo de exposición). Con frecuencia este concepto es incorrectamente denominado «velocidad de obturación». Para estudios realizados en condiciones de aire libre, un tiempo de obturación de 1/1000 s se indica como suficiente para obtener imágenes de calidad (Borgström, et al., 1995). Este tiempo de obturación también se ha mostrado válido para movimientos rápidos en condiciones indoor (Van Gheluwe, Roosen y Desloovere, 2003). A pesar de ello, se deben realizar ensayos en las mismas condiciones y horarios previos para determinar el tiempo de obturación óptimo de la cámara. Los principales problemas que aparecen cuando se graba con un tiempo de obturación inadecuado, son el oscurecimiento (tiempo insuficiente) y los barridos en las imágenes (tiempo excesivo), lo que conlleva dificultad a la hora de determinar y analizar posiciones del deportista debido a la falta de luminosidad y a la imagen distorsionada. Para facilitar la elección del tiempo de obturación óptimo, a continuación se añade una tabla (tabla 3) propuesta por Knudson y Morrison (2002).

TABLA 3  
 Tipo de actividad y tiempo de obturación (adaptado de Knudson y Morrison, 2002)

Actividad	Frecuencia de muestreo (Hz)
Caminar	1/6000000000000
De sentado a de pie	1/6000000000000
Bolos	1/6000000000000
Baloncesto	1/1000000000000
Salto vertical	1/1000000000000
Footing	1/100 a 1/2000000000000
Carreras de velocidad	1/200 a 1/5000000000000
Lanzamiento en béisbol	1/500 a 1/1000000000000
Golpeo en béisbol	1/500 a 1/1000000000000
Chut en futbol	1/500 a 1/1000000000000
Tenis	1/500 a 1/1000000000000
Golf	1/1000 o menores

## 6. Sistema de compresión (codecs)

El registro del vídeo por parte de las cámaras se realiza siguiendo un protocolo estandarizado, que determina el número de píxeles por fotograma y el número de fotogramas por segundo. Los vídeos, especialmente si son grabados con alta calidad y a frecuencias de muestreo elevadas, suponen una cantidad de información enorme. Su tratamiento para analizar el movimiento requiere de equipos muy potentes y de gran capacidad, tanto de procesamiento como de almacenamiento. Para aliviar el manejo de los vídeos, lo que se hace es comprimirlos utilizando algoritmos matemáticos que agrupan la información redundante. Esta acción depende de la información que se pretenda obtener del vídeo y de la compatibilidad del software utilizado para el análisis.

El término compresión hace referencia al almacenamiento de los datos en un espacio menor de la memoria intentando evitar pérdidas significativas de calidad, de forma que el dispositivo de reproducción pueda soportar el elevado volumen de datos. La compresión de los vídeos requiere un sistema de codificación (codec). Actualmente existen varios sistemas compresión y codificación, algunos de los más frecuentes se presentan en la tabla 4. A la hora de comprimir las imágenes, existe una relación inversa entre compresión y calidad de imagen, con lo que una mayor compresión supone menos espacio del vídeo, pero conlleva inevitablemente una pérdida de calidad. Cuando se utilizan vídeos para analizar la técnica deportiva hay que poner especial cuidado en no comprimir excesivamente las imágenes, puesto que puede dificultar la localización de los puntos anatómicos del modelo

TABLA 4  
Principales sistemas de compresión y codificación

Sistemas de compresión	Sistemas de codificación
AVI (Audio Video Interlace)	MPEG (Moving Picture Expert Group)
WMV / ASF (Windows Media Video)	WMV (Windows Media Video)
Real Video (para Real One)	DV (codec propio para captura firewire en mini DV)
MOV (Quick Time, para MAC y Microsoft)	DivX (ideal para reproducir de discos DVD a CD)
	Xvid (basado en el MPEG-4)
	MJPEG (secuencia de imágenes estáticas JPEG)

**Nota 1:** «firewire» es un puerto para la transmisión directa de datos desde la cámara al ordenador y que permite la captura directa en el disco duro del mismo. «Mini DV» es el tamaño más pequeño de cinta para grabar en vídeo digital.

**Nota 2:** se debe tener en cuenta el tipo de sistema operativo para el que está preescrito. Las dos opciones son: 32 bits o 64 bits. Normalmente, el codec especifica esta característica, por lo que lo único que se debe de hacer es consultar las propiedades del sistema operativo que se esté utilizando. Esta tarea se realiza, para el sistema Microsoft Windows XP, siguiendo la siguiente ruta: inicio » panel de control » sistema y mantenimiento » sistema.



### *Número y ubicación de las cámaras*

La realización de la reconstrucción tridimensional de un movimiento requiere al menos dos cámaras desde diferentes ángulos de visión. A mayor número de cámaras se incrementa el número de puntos de vista de la acción, consiguiendo una mayor precisión a la hora de determinar los puntos corporales (Challis y Kerwin, 1992) y reduce el número de puntos ocultos durante la fase de análisis (Gruen, 1997; Hallert, 1970). Sin embargo, implica una mayor dedicación temporal en la digitalización si ésta se realiza de forma manual. Se ha encontrado que a partir de tres o cuatro cámaras no mejora la exactitud (Hallert, 1970). En los estudios que realizan digitalización manual, lo normal es utilizar un número de dos o tres cámaras, en función de si el movimiento se realiza sobre un plano de ejecución bidimensional (por ejemplo, un salto de longitud en atletismo o un lanzamiento de peso) o sobre un plano tridimensional (por ejemplo, un salto de altura).

Las cámaras suelen estar estáticas manteniendo su campo de visión inmóvil en los estudios biomecánicos, puesto que la mayoría de acciones deportivas de elevada complejidad técnica se realizan en un espacio de dimensiones medias o reducidas (Soto, 1995). La ubicación de las cámaras debe estar lejos del deportista, en posiciones elevadas, estables y compactas. De esta forma se evita el efecto de deformación producido cuando se filma muy cerca del lugar donde se realiza el gesto (Plagenhoef, 1971), la interferencia de la grabación por desplazamiento de móviles y la vibración de la imagen. Hasta hace unos pocos años atrás, el posicionamiento óptimo de estas cámaras debía formar un ángulo de 90° entre los haces de las cámaras (Chen, Armstrong y Raftopoulos, 1994; Soto, 1995; Wood y Marshall, 1986), aunque esta técnica admite rangos entre 35° (Chen et al., 1994) y 140° (Soto, 1995). La separación lateral entre las cámaras y la distancia entre la cámara y el deportista se fija en una relación 1:3 o 1:2. Esto quiere decir que la distancia lateral entre las cámaras debería de ser dos o tres veces mayor que la distancia entre el deportista y la cámara (Wood y Marshall, 1986). Implica una mayor exactitud de cálculo de la DLT, aunque no representa diferencias estadísticamente significativas con otras relaciones. En los sistemas actuales basados en fotogrametría, las cámaras pueden ubicarse a 0° e incluso también a 180° (ej. sistema VICON), creando redundancias en la obtención de las posiciones de cada marcador, lo que incrementa la precisión de los datos obtenidos.

### *Sistema de referencia*

El sistema de referencias es el criterio por el que fijamos un punto cero desde el que comienzan las mediciones, unos ejes de coordenadas y el sentido positivo y negativo. Los sistemas de coordenadas representan la forma de dar a conocer una posición en un plano o en el espacio y pueden ser de dos clases en función del número

de ejes que utilicen: en dos dimensiones (2D) o en tres dimensiones (3D). El sistema de coordenadas en 2D puede ser: cartesiano (distancia proyectada en los dos ejes) o polar (distancia al centro de coordenadas y un ángulo a uno de los ejes). El sistema de coordenadas en 3D puede ser: cartesiano (proyección en los tres ejes), cilíndrico (distancia en una proyección hasta el centro de coordenadas, proyección sobre el eje vertical y un ángulo) o esférico (distancia hasta el centro de coordenadas, ángulo con un eje y ángulo de una proyección con otro eje). El sistema de coordenadas 3D cartesiano es el más utilizado en biomecánica. El sentido del giro (positivo o negativo) se fija en función de un criterio: regla de la mano derecha (el sentido positivo es el giro antihorario) o particular (el sentido positivo es la dirección principal del movimiento, independientemente que coincida o no con el giro antihorario) (Aguado, González e Izquierdo, 1997). Cada cámara debe tener su propio sistema de referencias con su sistema de coordenadas 2D (Wolf, 1983).

Se utiliza una imagen de referencia registrada por cada cámara y que contiene un objeto cuyos datos espaciales (valores de las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) se conocen de antemano (Gruen, 1977) para determinar el sistema de referencias. Se trata de la técnica de calibración más utilizada en el análisis de las técnicas deportivas. En biomecánica, este objeto se denomina «marco de calibración» (figura 1) (Yeadon, 1990). El marco de calibración puede ser un objeto físico o puede reconstruirse posteriormente en el software de análisis a partir de otros datos (medidas conocidas del lugar donde compite el deportista). Este objeto permite situar el sistema de referencias en las imágenes y establecer la escala entre las imágenes reales y las imágenes grabadas (Lehmann, 1975), de forma que las coordenadas que se miden sobre las imágenes pueden ser transformadas a medidas reales. Las medidas del marco de calibración son calculadas mediante la ecuación matemática de DLT (triangulación a partir de la grabación de varios planos diferentes, buscando la intersección de las coordenadas de un punto proyectadas en cada plano, lo que daría lugar a la obtención de sus coordenadas en 3D) para la reconstrucción 3D del movimiento (Abdel-Aziz y Karara, 1971).

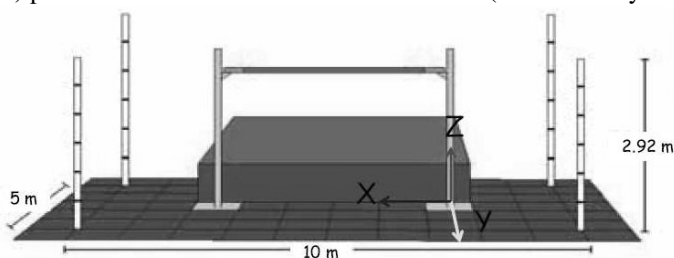


FIGURA 1: Ejemplo de construcción de un marco de calibración rectangular utilizando un sistema de coordenadas cartesiano (donde «x» es la dirección principal del movimiento, «z» es la dirección vertical e «y» es el movimiento hacia la izquierda respecto al movimiento del saltador en la batida), a partir de postes verticales independientes con una distribución de puntos perimetral para el análisis de la batida del salto de altura (Bermejo, Palao y Elvira, 2011).

El procedimiento de calibración permite conocer la orientación de las cámaras (Dapena, Harman y Miller, 1982). La grabación del marco de calibración se realiza antes y después de la ejecución de la acción técnica por cada cámara. Esto se realiza por si durante la grabación se produjeran movimientos de las cámaras o variaciones en el zoom de la imagen.

El marco de calibración requiere una serie de aspectos importantes: a) debe abarcar todo el espacio sobre la que se realiza el movimiento (Gazzani, 1993), puesto que cuanto mayor sea el número de puntos del atleta que se encuentran fuera de este objeto mayor es el error en la reconstrucción del movimiento (Hinrich y McLean, 1995; Wood y Marshall, 1986); b) el número de puntos de control mínimo para asegurar la exactitud de la reconstrucción es de seis, incrementándose esta exactitud al aumentar el número de puntos (Hazte, 1988), fijándose el número óptimo en 24 puntos (Kofman, Miller, Knopf y Zecevic, 1998) y no habiendo mejoras estadísticamente significativas en la reconstrucción cuando se supera este número (Chen et al., 1994; Challis, 1995); y c) la distribución de los puntos que permiten determinar las coordenadas espaciales del deportista debe ser perimetral (distribuidos en el contorno) al espacio de análisis (Challis y Kerwin, 1992; Chen et al., 1994; Wood y Marshall, 1986).

#### *Determinación del nivel de extrapolación*

El nivel de extrapolación permite conocer el número de puntos digitalizados fuera de la región de control (espacio delimitado por el marco de calibración). Para ello, se anota el número total de puntos (número de puntos digitalizados que forman el modelo mecánico del saltador multiplicado por el número de coordenadas, tres, y multiplicado por el número de fotogramas resultantes), el número de puntos fuera de la región de control (puntos que exceden la medida del marco de calibración en cada uno de los tres ejes) y se aplica una regla de tres simple. Esta prueba es necesario realizarla en los estudios de tipo fotogramétrico que utilizan una imagen de referencia para realizar la calibración. Cuanto mayor es el número de puntos digitalizados fuera de la región de control, menor es la precisión de los datos obtenidos.

#### *Sincronización de las imágenes*

Conseguir que la secuencia de imágenes digitalizada en una cámara corresponda, fotograma a fotograma, con la misma secuencia de imágenes en otra cámara requiere un procedimiento denominado sincronización de las cámaras. Con este procedimiento se evitan los saltos o movimientos en la imagen cuando se pasa de una cámara a otra durante el proceso de digitalización. Esta sincronización o correspondencia temporal de los fotogramas se puede realizar de dos formas: sincronización externa o sincronización interna.

La sincronización externa se realiza a través de la unión de las cámaras de vídeo mediante cable coaxial. El cable coaxial envía a la cámara la cadencia de sincronización, de forma que las cámaras conectadas a este cable comienzan y finalizan la grabación al mismo tiempo. Con este procedimiento las secuencias de imágenes obtenidas coincidirán temporalmente, por lo que un mismo fotograma en diferentes cámaras representará el mismo instante del movimiento deportivo, pero desde un punto de vista diferente. Al transferir los vídeos al ordenador para realizar su análisis no hace falta tratarlos digitalmente, únicamente seleccionar el instante temporal de inicio y final de la acción. Por desgracia, esta opción de sincronización solamente está disponible en cámaras de gama alta.

La sincronización interna se realiza a través del software de análisis utilizado en la investigación. Para ello, se definen una serie de eventos o instantes, que normalmente suele ser un momento temporal claramente visible de la acción deportiva (ej. el inicio del contacto del pie en un apoyo de batida) o un momento concreto del movimiento (ej. máximo doblaje de la pértiga en la fase de ascenso). Con este proceso se unifica el instante inicial en cada cámara, con lo que queda garantizado el ajuste de fotogramas en todas ellas. Aun así, si las cámaras no están sincronizadas físicamente mediante el cable de sincronía, puede existir un desajuste temporal real de medio fotograma por delante o por detrás. Algunos programas de análisis son capaces de compensar esta diferencia temporal mediante el ajuste de las coordenadas de los puntos del modelo a ecuaciones polinómicas a partir de las que se puede predecir la posición de cada punto en los mismos instantes en cada cámara. El tipo de polinomio más común en la actualidad es la función spline de quinto grado (Wood y Jennings, 1979). Esta función permite minimizar el error de ajuste y conseguir una curva suave (ver más adelante).

### *Representación del deportista*

La representación del deportista se realiza utilizando un modelo mecánico de segmentos articulados (Soto y Gutiérrez, 1996). Se trata de concebir al cuerpo como un sistema de palancas (Nordin y Frankel, 2001). En biomecánica, independientemente de que el análisis sea en 2D o 3D, lo normal es utilizar un modelo de 22 puntos anatómicos que definen 14 segmentos (McDonald y Dapena, 1991). Cuando el análisis del movimiento se realiza en un plano 2D también se puede utilizar el modelo simplificado de 13 puntos para un lado del cuerpo, derecho o izquierdo (punta del pie, talón, tobillo, rodilla, cadera, hombro, codo, muñeca, mano, supraexternal, gonio-maxilar, vértex). Para la determinación de estos puntos anatómicos se utiliza un modelo humano basado en centros articulares de rotación (intersección entre dos líneas o segmentos) y puntos de referencia anatómicos estándares (ej. vértex). El resultado

es un modelo humano simplificado formado por líneas y puntos que permiten describir posiciones y registrar variables derivadas del espacio y del tiempo (figura 2). En la tabla 5 se expone la definición de cada segmento corporal. Los puntos proximales de cada segmento se definen teniendo en cuenta el criterio cráneo-caudal, es decir, el punto proximal del segmento es el que más se aproxima a la cabeza y el punto distal es el que más se aleja, partiendo de una posición anatómica (ej. en el brazo el punto proximal es el hombro y el punto distal es el codo).

No existe un método preciso para la localización de estos puntos, pero se recomienda hacerlo determinando el eje longitudinal medial de cada uno de los segmentos que forman la articulación (De Leva, 1996). Su localización se define en la intersección de las dos líneas. El resultado es un modelo articulado de barras que representa la figura del deportista.

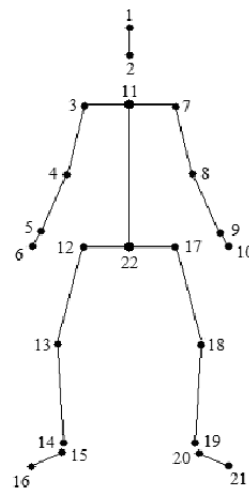


FIGURA 2: Representación del modelo humano de 22 puntos y 14 segmentos

TABLA 5  
Definición del modelo mecánico a partir de 22 puntos y 14 segmentos

N.º Segmento	Punto proximal	Punto distal
1 Cabeza	Vértex	Mandíbula
2 Tronco	Centro entre hombros	Centro entre caderas
3 Brazo Derecho	Hombro derecho	Codo derecho
4 Antebrazo Derecho	Codo derecho	Muñeca derecha
5 Mano Derecha	Muñeca derecha	Articulación dedo medio
6 Brazo Izquierdo	Hombro izquierdo	Codo izquierdo
7 Antebrazo Izquierdo	Codo izquierdo	Muñeca izquierda
8 Mano Izquierda	Muñeca izquierda	Articulación dedo medio
9 Muslo Derecho	Cadera derecha	Rodilla derecha
10 Pierna Derecha	Rodilla derecha	Tobillo derecho
11 Pie Derecho	Talón derecho	Punto distal metatarsiano
12 Muslo Izquierdo	Cadera izquierda	Rodilla izquierda
13 Pierna Izquierda	Rodilla izquierda	Tobillo izquierdo
14 Pie Izquierdo	Talón izquierdo	Punto distal metatarsiano

### Digitalización

El proceso de digitalización se basa en el marcaje de los puntos definidos en el modelo mecánico, en cada uno de los fotogramas que componen la secuencia de movimiento, y en cada uno de los planos grabados. Este proceso se puede realizar de dos formas: digitalización automática o digitalización manual. La digitalización automática

tica la realiza el software, determinando el punto central de unos marcadores corporales (adhesivos reflectantes) ubicados en las articulaciones y segmentos del deportista, a partir del reconocimiento de todos los píxeles que se encuentran por encima de un umbral de luz. La digitalización manual se basa en determinar a través del puntero del ratón cada uno de los puntos que definen el modelo mecánico y presenta dos opciones: con marcadores corporales o sin marcadores corporales. Bartlett, Bussey y Flyger (2006) afirman que la digitalización con ausencia de marcadores corporales no permite una estimación fiable de la variabilidad del movimiento en comparación con la digitalización utilizando marcadores. La digitalización automática es más precisa que la realizada de forma manual (Wilson et al., 1999). Sin embargo, esta característica hace que presente una doble problemática: depende de las condiciones de luz y la colocación de marcadores en el deportista puede influir en el movimiento, alterando la forma de ejecución. Esta opción no es viable en condiciones de competición oficial.

La digitalización manual se puede llevar a cabo de dos formas: todos los puntos fotograma a fotograma o digitalizar un punto en todos los fotogramas y posteriormente pasar a otro. El estudio de Bahamonde y Stevens (2006) revela que el método de digitalización manual basado en el seguimiento de un solo punto a lo largo de la secuencia de imágenes, tanto para digitalizadores experimentados como inexpertos, resulta más preciso y reduce el suavizado de los datos.

#### *Determinación de los centros de masas de los segmentos y del cuerpo*

Crear una simulación que reconstruya el movimiento analizado y obtener una ubicación precisa de los centros de masas de los segmentos y del cuerpo a partir de las digitalizaciones (automáticas o manuales) requiere determinar el valor de los parámetros inerciales que definen el modelo mecánico (Yeadon y King, 2008). De estos parámetros se conoce la masa, el vector posición del centro de masas y los momentos de inercia ( $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ , e  $I_{zz}$ ). Actualmente, los parámetros inerciales corporales más empleados son los aportados por De Leva (1996), adaptados de los datos de Zatsiorsky y Seluyanov (1985) y que diferencian entre el modelo masculino y femenino (tabla 6). Estos parámetros corrigen el error de estudios anteriores con cadáveres (Clauser, McConville y Young, 1986) o con grandes muestras que toman como referencia las marcas óseas en vez de centros articulares de rotación y puntos anatómicos de referencia estándares (Zatsiorsky, Seluyanov y Chugunova, 1990). Estos parámetros junto con las coordenadas del segmento permiten ubicar el CM mediante la siguiente ecuación matemática:

$$CGT = \Sigma \{G_{pi} - [K_i (G_{pi} - G_{di})] \cdot P_i\}$$

Donde:

CGT = centro de gravedad total.

Gpi y Gdi = coordenadas (x, y o z) proximal y distal.

Ki = distancia desde el punto proximal al CM del segmento, en % de 1 de la distancia total de cada segmento.

Pi = porcentaje de peso de cada segmento, en % de 1.

TABLA 6  
Parámetros inerciales en hombres y mujeres (DeLeva, 1996)

Segmento	Hombres		Mujeres	
	Masa (%)	CM (%)	Masa (%)	CM (%)
Cabeza y cuello	6.94	49.05	6.68	50.74
Tronco	43.46	51.53	42.57	49.28
Brazo	2.71	49.81	2.55	48.84
Antebrazo	1.62	45.15	1.38	45.00
Mano	0.61	78.72	0.56	74.49
Muslo	14.17	42.41	14.78	43.13
Pierna	4.33	45.54	4.81	45.38
Pie	1.37	44.15	1.29	40.14

Leyenda: % masa: porcentaje de masa del segmento sobre el total de todo el cuerpo;  
% CM: porcentaje de ubicación del centro de masas del segmento en relación a su longitud total.

En la tabla con los datos referidos a los parámetros inerciales corporales en hombres y mujeres (tabla 6), se puede destacar como el tronco representa el segmento que más pesa. Esto hace que en algunos estudios se hayan planteado la subdivisión del mismo en tres partes. Las mayores diferencias entre los hombres y las mujeres se dan precisamente en este segmento. Los otros dos segmentos donde se producen las mayores diferencias entre géneros dan en la extremidad inferior (muslo y pierna), teniendo en las mujeres un mayor porcentaje de masa que en los hombres (0.61% y 0.48%, respectivamente).

#### *Validez, fiabilidad y objetividad del análisis 3D*

La técnica de captación del movimiento con cámaras estáticas y tomando una imagen de referencia para realizar el procedimiento de calibración de las cámaras, presenta una serie de errores asociados a los aparatos de medición (fiabilidad, validez, objetividad, precisión y calibración), a la metodología (validación y estandarización del procedimiento) y al investigador (formación/aprendizaje). Estos errores no se desprecian, sino que se deben conocer y asumir. Estos corresponden a errores sistemáticos y errores aleatorios (Hazte, 1990). El error sistemático hace referencia a los aparatos de medida y a la metodología, produciéndose durante las grabaciones y al determinar las coordenadas de posicionamiento del deportista (Navarro, 1994). En

este sentido, la validez del análisis 3D en este tipo de estudios no se tiene en cuenta, porque se trata de una metodología de análisis previamente validada y utilizada en gran cantidad de investigaciones.

El error aleatorio depende de la persona que realiza la medición, el digitalizador, y determina la fiabilidad. La fiabilidad puede ser intra-observador (estabilidad de los datos obtenidos por un mismo investigador ante un proceso de análisis repetido) o inter-observador (variabilidad de los datos obtenidos al comparar las mediciones de varios investigadores). Cuanto menor sea este error, mayor será la fiabilidad de los resultados registrados en el análisis del movimiento. Existen varios métodos o ecuaciones matemáticas para determinar estos errores: diferencia o error absoluto ( $E_a = V - V_r$ ), porcentaje o error relativo ( $E_r = E_a / V_r \times 100$ ; o  $V_r = V_1 + V_2 + V_3 / V_n$ ), elevación a una potencia, correlación y regresión (cerca de 1 o -1 y significativas,  $p < 0.05$ ), comparación de medias (T de Student), ANOVA (varianza), error metódico ( $ME = SD / \sqrt{2}$ ), error estándar ( $SE = SD / \sqrt{n - 1}$ ) y desviación típica ( $SD = \sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 / n - 1}$ ). Del mismo modo, existen diversos factores que pueden afectar a la fiabilidad: número y ubicación de las cámaras utilizadas, sistema de digitalización (automático o manual), criterio de marcación de cada investigador, o procedimiento de suavizado.

El procedimiento de suavizado se basa en ajustar la precisión en el cálculo de las variables a partir de errores que pueden cometerse al determinar las coordenadas 3D. En este procedimiento se puede: a) minimizar la curva de ajuste y b) conseguir una curva suave (depende de la precisión en la digitalización de los puntos anatómicos). Minimizar la curva de ajuste depende de la frecuencia de muestreo de las cámaras de vídeo y puede mejorarse: seleccionando una cámara que registre más imágenes por segundo (ej. cámaras de alta velocidad en lugar de cámaras a 50 Hz) o aplicando el procedimiento de interpolación de datos (introducir de forma informatizada una medida temporal entre instantes, ej. para una cámara que graba a 50 Hz se introduce un valor estimado entre cada instante separado 0.02 s). Conseguir una curva suave depende del proceso de digitalización y puede mejorarse aplicando un filtro digital que elimine frecuencias altas (el movimiento se produce en una frecuencia baja y los errores al marcar que provocan un movimiento brusco o ruido se producen en una frecuencia alta). Un ejemplo de filtrado es el filtro de paso bajo del tipo Butterworth de 2.º orden descrito por Winter, Sidwall y Hobson (1979) y cuya frecuencia de corte en los estudios cinemáticos suele estar en torno a 6 Hz.

#### CONCLUSIONES

El análisis 3D del movimiento a través de la cinemática representa un abordaje común en los estudios biomecánicos que tratan de ahondar en la técnica deportiva.



En función del tipo de movimiento que se analice, las características del sistema de registro utilizado, los recursos materiales con los que se cuenten y los datos que se pretendan obtener, se deben seguir unos pasos que aseguren la validez, fiabilidad y objetividad del procedimiento. En este artículo se presentan los pasos a seguir y los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se aborda el estudio cuantitativo del movimiento humano en situaciones deportivas, a través de la técnica fotogramétrica tridimensional que utiliza el vídeo digital como método de registro de información. Además, se exponen los principales problemas que puede llevar consigo no seguir el procedimiento adecuado.

La reconstrucción 3D, utilizando como técnica de captación las cámaras de vídeo digital y posterior tratamiento en el ordenador, representa una técnica compleja y con un amplio margen de mejora en el futuro. Por ello, es necesario que los alumnos en ciencias de la actividad física y del deporte se familiaricen y comprendan el significado de diversos conceptos y tecnologías utilizadas para los análisis biomecánicos en 3D. Este artículo explica los conceptos que se abordan en los estudios del movimiento desde la perspectiva biomecánica utilizando la metodología fotogramétrica. Con la realización del mismo se pretende mejorar la comprensión de dichos estudios y entender el procedimiento que en ellos se lleva a cabo. La información que aquí aparece puede ser utilizada como parte complementaria a la formación de los alumnos en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte.

#### REFERENCIAS

- Abdel-Aziz, Y. I. y Karara, H. M. (1971). Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Symposium on close-range photogrammetry*. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, pp. 1-18.
- Aguado, X., González, J. L., e Izquierdo, M. (1997). *Biomecánica fuera y dentro del laboratorio*. Universidad de León. León.
- Allard, P., Blanchi, J. O., y Aissaoui, R. (1997). *Three dimensional analysis of human movement*. Ed: Paul Allard, Jean Pierre Blanchi, Ian A.F. Stokes.
- Angulo, R. M. y Dapena, J. (1992). Comparison of Film and Video Techniques for Estimating Three-Dimensional Coordinates Within a large Field. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2, 145-151.
- Bahamonde, R. y Stevens, R. (2006). *Comparison of two methods of manual digitization on accuracy and time of completion*. XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports. Salzburg: Austria, pp 680-684.
- Bartlett, R. (2007). *Introduction to sports biomechanics. Analysing human movement patterns (2.ª ed.)*. London: Routledge, pp. 115-162.
- Bartlett, R., Bussey, M., y Flyger, N. (2006). Movement variability cannot be determined reliably from no-marker conditions. *Journal of Biomechanics*, 16, 3076-3079.

- Bermejo, J., Palao, J. M., y Elvira, J. L. L. (2011). Effect of age on high jump take-off biomechanics. *Portuguese Journal of Sport Sciences*, 2, 155-158. Proceedings of: XXIX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport. Oporto: Portugal, 2011.
- Borgström, A., Bartonietz, K., Morris, C., Fowler, N., Lilleheim, M., Henriksson, A., y Keihäs, J. (1995). *Biomechanics of the throwing events, an introduction to a simplified way of analysing with normal videoequipment*. En Biomechanics, Special edition of the express information given in the throwing events during the 5th IAAF World Championships in Athletics, Göteborg: 1-15.
- Calvert, T. W. y Buderlin, A. (1995). *Computer graphics for visualization and animation*. En: Three-dimensional Analysis of Human Movement (editado por Allard, P., Stokes, I., y Blanchi, J. P.), pp 101-123. Human Kinetics. Champaign, Illinois.
- Challis, J. H. (1995). A multiphase calibration procedure for the Direct Linear Transformation. *Journal of Applied Biomechanics*, 3, 351-358.
- Challis, J. H. y Kerwin, D. G. (1992). Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry. *Journal of Biomechanics*, 9, 1053-1058.
- Chen, L., Armstrong, C. W., y Raftopoulos, D. D. (1994). An investigation on the accuracy of three dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 4, 493-500.
- Clauser, C. E., Mc Conville, J. T., y Young, J. W. (1986). Weight, volume and center of mass of segments of the human body. *Journal of Biomechanics*, 10, 269- 277.
- Dapena, J., Harman, E. A., y Miller, J. A. (1982). Three-Dimensional cinematography with control object of unknown shape. *Journal of Biomechanics*, 1, 11-19.
- De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameter. *Journal of Biomechanics*, 9, 1223-1230.
- Gazzani, F. (1993). Comparative assessment of two algorithms for calibrating stereophotogrammetric systems. *Journal of Biomechanics*, 12, 1449-1454.
- Grimshaw, P. y Burden, A. (2007). *Sport and exercise biomechanics*. London: Taylor and Francis Group, pp. 295-316.
- Gruen, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry – A review. *Human Movement Science*, 2, 155-187.
- Hallert, B. (1970). *Photogrammetry*. Nueva York: McGraw Hill.
- Hazte, H. (1988). High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *Journal of Biomechanics*, 7, 533-538.
- Hazte, H. (1990). *Date conditioning and differentiation techniques*. En N. Berme y A. Cappozzo (Eds), Biomechanics of Human Movement: Applications in Rehabilitation, Sports and Ergonomics, pp 237-248. Worthigton, Ohio: Bertec Corporation.
- Hinrichs, R. N. y McLean, S. P. (1995). NLT and extrapolated DLT: 3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration. *Journal of Biomechanics*, 10, 1219-1223.
- Kennedy, P. W., Wright, D. L., y Smith, G. A. (1989). Comparison of film and video techniques for three-dimensional DLT reproductions. *International Journal of Sports Biomechanics*, 4, 4457-4460.

- Kerwin, D. G. y Twigg, D. R. (1998). *Precision and Accuracy of Video and Cinefilm Digitising Systems*. North American Congress on Biomechanics. Waterloo, Ontario: Canada. (<http://asb-biomech.org/NACOB98/212/index.html>) [consulta: 12/04/2012].
- Kofman, J., Miller, D. I., Knopf, G. K., y Zecevic, A. (1998). *Calibration and measurement accuracy of a stereophotogrammetric system using the direct linear transformation*. North American Congress on Biomechanics. Waterloo, Ontario: Canada. (<http://asbbiomech.org/NACOB98/107/index.html>) [consulta: 12/04/2012].
- Knudson y Morrison (2002). Knudson, D. y Morrison, C. (2002). *Qualitative analysis of human movement*. Champaign, IL: Human Kinetics, p 207.
- Lehmann, G. (1975). *Fotogrametría*. Barcelona: Editores Técnicos asociados S.A.
- McDonald, C. y Dapena, J. (1991). Linear kinematics of the men's 110-m and women's 100-m hurdles races. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12, 1382-1391.
- Navarro, E. (1994). *Análisis Biomecánico de la Técnica Individual del Lanzamiento de Jabalina*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Nelson, R. y Miller, D. (1988) *Biomechanics in Sports*. Philadelphia: Lea & Febinger.
- Nordin, M. y Frankel, V. H. (2001). Basic biomechanics of the musculoskeletal system. *Journal of Biomechanics*, 6, 872.
- Pearsall, D. y Reid, J. G. (1994). The Study of Human Body Segment Parameters in Biomechanics. *Sports Medicine*, 2, 126-140.
- Pérez Soriano, P. y Llana Belloch, S. (2007). La instrumentación en la biomecánica deportiva. *Journal of Human Sport and Exercise*, 2, 26-41.
- Planenhoef, S. (1971). *Patterns of human motion, a cinematographic analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Payton, C. y Bartlett, R. (2008). *Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise*. London: Routledge.
- Soto, V. M. (1995). *Desarrollo de un sistema para el análisis biomecánico tridimensional del deporte y la representación gráfica realista del cuerpo humano*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Universidad de Granada.
- Soto, V. M. y Gutiérrez, M. (1996). Parámetros inerciales para el modelado biomecánico del cuerpo humano. *Revista Motricidad*, 2, 169-189.
- Van Gheluwe, B., Roosen, P., y Desloovere, K. (2003). Rearfoot kinematics during initial take-off of elite high jumpers: estimation of spatial position and orientation of subtalar axis. *Journal of Applied Biomechanics*, 19, 13-27.
- Wilson, D. J., Smith, B. K., Gibson, J. K., Choe, B. K., Gaba, B. C., y Voelz, J. T. (1999). Accuracy of digitization using automated and manual methods. *American Physical Therapy Association*, 6, 558-566.
- Winter, D. A., Sidwall, H. G., y Hobson, D. A. (1974). Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion. *Journal of Biomechanics*, 2, 157 - 159.
- Wood, G. A. y Jennings, L. S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 6, 477-479.

- Wood, G. A. y Marshall, R. N. (1986). The accuracy of DLT extrapolation in three dimensional film analysis. *Journal of Biomechanics*, 9, 781-785.
- Wolf, P. R. (1983). Elements of photogrammetry. Nueva York: McGraw Hill.
- Yeadon, M. R. (1990). The simulation of aerial movements-I. The determination or orientation angles from film data. *Journal of Biomechanics*, 1, 59-66.
- Yeadon, M. R. y King, M. A. (2008). *Computer simulation modeling in sport*. En C. J. Payton y R. M. Barlett, Biomechanical analysis of movement in sport and exercise. London: Routledge, pp 176-205.
- Zatsiorsky, V. M. y Seluyanov, V. (1985). *Estimation of the mass and inertia characteristics of the human body by means of the best predictive regressions equations*. Biomechanics IX-B (editado por Winter, D. y cols.). Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers, pp. 233-239.
- Zatsiorsky, V. M., Seluyanov, V. N., y Chugunova, L. G. (1990). *Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments*. En G. G. Chernyi y S. A. Regirer, Contemporary Problems of Biomechanics. USA: CRC Press, pp. 272-291.