

# Jornadas de Automática

## Sistema para la mejora del entrenamiento del lanzamiento de disco

Moreno-Salinas, D.<sup>a,\*</sup>, Sánchez-Moreno, J.<sup>a</sup>, Álvarez, J.C.<sup>b</sup>, Revuelta, C.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), C/ Juan del Rosal, 16, 28040 Madrid, España.

<sup>b</sup> Real Federación Española de Atletismo (RFEA), Av. Valladolid, 81, 28008, Madrid, España.

<sup>c</sup> Faculty of Sport Sciences, Universidad Europea de Madrid, Madrid, Spain.

**To cite this article:** Moreno-Salinas, D., Sánchez-Moreno, J., Álvarez, J.C., Revuelta, C. 2024. System for the Improvement of the Discus Throwing Training. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10615>

### Resumen

En este trabajo se presenta el estado de desarrollo de un sistema de bajo coste orientado a entrenadores y atletas de alto rendimiento para la mejora de la técnica del lanzamiento de disco. El sistema está basado en el análisis conjunto de la información proporcionada por unidades de medida inerciales (IMU) y una cámara de vídeo. Inicialmente, las IMU se ubican en cinco puntos del cuerpo del lanzador (tobillo izquierdo y derecho, sacro, esternón y muñeca), así como en el interior del disco. La utilidad de las IMU es proporcionar datos de las aceleraciones y de los ángulos de orientación que permitan derivar de forma directa e indirecta ciertos parámetros biomecánicos del atleta durante el lanzamiento (p.e., desfase angular entre el eje de caderas, hombros y disco, velocidades angulares del disco, hombros y cadera, velocidad y ángulos de salida del disco, ángulo de spinning aplicado al disco, etc.), así como identificar las fases temporales que comporta todo lanzamiento y que determinan la calidad de éste, con el objetivo de maximizar la distancia de vuelo del disco. En lo que respecta al vídeo, éste se basa en la utilización de una única cámara para obtener un modelo de alambre 3D del atleta. Para ello, el vídeo se procesa mediante técnicas de aprendizaje profundo que obtienen la secuencia temporal de coordenadas 3D de hasta 23 puntos del cuerpo del atleta. Estos datos, junto con la información de las IMU, permiten mejorar el modelado biomecánico con parámetros como la ubicación del centro de masas del atleta y la evolución del momento angular del disco y del lanzador.

*Palabras clave:* Monitorización, Diagnóstico de fallos, Información y fusión sensorial, Modelado del rendimiento humano.

### System for the Improvement of the Discus Throwing Training

#### Abstract

This paper presents the state of development of a low-cost system aimed at coaches and high-performance athletes for the improvement of the discus throw technique. The system is based on the analysis of the information provided by inertial measurement units (IMUs) and a video camera. Initially, the IMUs are located at five points on the thrower's body and inside of the discus. The purpose of the IMUs is to provide data on linear accelerations and orientation angles to allow the direct and indirect derivation of certain biomechanical parameters of the athlete during the throwing (e.g., offset angles between hips, shoulders and discus, angular velocities of the disc, shoulders and hips, velocity and angles of the discus when leaving the hand, spinning angle applied to the discus, etc.) In that way, it lets automatically to identify the time phases involved in each throw and so determine the quality of it with the final objective of maximizing the flight distance of the discus. Regarding the video, it is based on the use of a single camera to obtain a 3D wireframe model of the athlete. For such a purpose, the video is processed using deep learning techniques that obtain the temporal sequence of 3D coordinates of up to 23 points of the athlete's body. This data, together with information from the IMUs, allows for the improvement of the biomechanical modelling with parameters such as the location of the athlete's centre of mass and the evolution of the angular momentum of the discus and thrower.

*Keywords:* Monitoring, Fault diagnosis, Information and sensor fusion, Modelling of human performance.

## 1. Introducción

La mejora de las técnicas de entrenamiento aplicadas a cualquier disciplina relacionada con el atletismo es un proceso que no se detiene nunca; especialmente si hablamos del alto rendimiento donde batir las mejores marcas, ya sea a nivel nacional o internacional, es el principal objetivo. Para lograr estas mejoras siempre se ha tratado de recurrir a la ayuda de la tecnología más adecuada para tal fin y que estuviese disponible en ese momento (Balmer *et al.*, 2012). El ejemplo más conocido en el ámbito del atletismo es la evolución del empleo de imágenes para analizar la técnica de ejecución del deportista y tratar de depurarla (Gregor *et al.*, 1985) (Hay and You, 1995) (Badura, 2010) (Chen *et al.*, 2021) (Wang *et al.*, 2022). Otro ejemplo que ya se emplea desde hace años es el de las unidades de medida inercial (conocidas como IMU por sus siglas en inglés) ubicadas en puntos concretos del cuerpo del atleta (Brice *et al.*, 2018) (Mason *et al.*, 2023). Las IMU constituyen un tipo de sensor que se adecúa perfectamente al atletismo ya que permiten obtener medidas exactas de las aceleraciones lineales y angulares de partes concretas del cuerpo del atleta, así como conocer sus orientaciones, y poder derivar de forma directa o indirecta parámetros biomecánicos (centros de masas, momentos de inercia, momentos angulares) que sean relevantes para el entrenador (Barlett, 1992). Pese a la abundancia de ejemplos de la fusión atleta y tecnología, no podemos obviar la tendencia a utilizar sensores adheridos a la piel para la medida en tiempo real o a posteriori de determinadores marcadores biológicos como, por ejemplo, la cantidad de glucosa en sangre de los fondistas (Flockhart and Larsen, 2023).

Sin embargo, el gran inconveniente de lo expuesto es que el acceso a estas tecnologías para su aplicación en el atletismo de élite puede llegar a ser muy costosa (piénsese en cámaras de elevada velocidad, arrays láser, sistemas UWB, etc.) y/o requerir conocimientos avanzados de hardware y/o software para, por ejemplo, desarrollar una aplicación final basada en un conjunto de IMU. Sin obviar que, en muchas ocasiones, la disponibilidad de estos sistemas se restringe a un centro de alto rendimiento específico o a un laboratorio de biomecánica avanzada; imposibilitando que un entrenador y su atleta, ambos ubicados en una pista de atletismo de una ciudad cualquiera, tengan acceso a estos recursos en el día a día.

Afortunadamente, gracias a la miniaturación de los dispositivos electromecánicos, al incremento de la potencia de cálculo y espacio de almacenamiento de los teléfonos/tabletas/portátiles y a los avances en las técnicas de procesamiento de datos es posible hoy en día ir un paso más allá y vencer estas limitaciones. Ya es posible adquirir a bajo coste entornos basados en IMU enfocados a la captura de parámetros cinemáticos del cuerpo humano (precio medio de IMU 100 €); y su puesta en marcha es, prácticamente, inmediata, sin necesidad de disponer de conocimientos a nivel de hardware y con muy poco esfuerzo a nivel software ya que disponen de librerías de desarrollo o aplicaciones para su manejo a través de Bluetooth (p.e., Movella, MbientLab, Opal APDM, etc.) Todo lo anterior sumado al acceso gratuito a potentes herramientas de tratamiento de vídeo que recurren a técnicas de aprendizaje profundo, dejan la puerta abierta al

desarrollo de nuevas herramientas de bajo coste para la mejora del entrenamiento de atletas de alto nivel.

Centrando la narrativa en el lanzamiento de disco, ya existen algunos trabajos basados en el empleo de IMU para la medida de ángulos y orientaciones tanto del artefacto (Liu *et al.*, 2011) como de partes concretas del cuerpo del lanzador (Brice *et al.*, 2018) (Navarro-Iribarne *et al.*, 2022). Sin embargo, estos trabajos son estudios, no se pueden considerar herramientas finales destinadas al entrenamiento como tal.

Este trabajo se centra en describir el estado actual en que se encuentra el sistema portátil y de bajo coste que se está desarrollando en colaboración con la Real Federación Española de Atletismo. El sistema está enfocado a mejorar la técnica de lanzadores de disco de élite, es decir, atletas de ambos géneros que lanzan por encima de 50 m. de forma regular. Esta categoría de lanzadores posee tal nivel de repetibilidad en sus movimientos que, en muchas ocasiones, la percepción visual del entrenador, pese a su experiencia, no es suficiente para recomendar sutiles ajustes en la técnica del lanzador de forma que, posteriormente, se traduzcan en mayores distancias en un concurso de lanzamiento. Es por ello por lo que es necesario recurrir a medidas cuantitativas de precisión que permitan tomar decisiones, bien en tiempo real o bien en los instantes posteriores a una sesión de entrenamiento, de forma que produzcan una realimentación útil al atleta. El sistema debe permitir que un entrenador, trabajando con su atleta en su instalación deportiva habitual o incluso en una competición, pueda analizar de forma cuantitativa un lanzamiento y tomar decisiones similares a las que podría tomar si estuviese trabajando en un centro de alto rendimiento. Así, el entrenador y atleta podrán realizar pruebas y simulaciones controladas para evaluar cómo ciertos ajustes en la técnica afectan el rendimiento y diseñar planes de perfeccionamiento basado en los hallazgos del análisis.

Por ello, el sistema debe ser sencillo y fácil de instalar para el entrenador; además, debe ser escalable, es decir, que con el mínimo número de sensores obtenga el mayor número de parámetros cinemáticos que sea posible. Por ejemplo, es posible introducir una IMU en el interior de un disco durante un entrenamiento, pero en una competición oficial está prohibido; es decir, que el ángulo o la velocidad de salida del disco no se podrían saber. Sin embargo, el atleta sí puede llevar durante el concurso una IMU colocada en su antebrazo y en base a los datos proporcionados por esa unidad estimar de forma indirecta el ángulo y la velocidad del disco. De igual forma, puede llevar sensores en el tronco y/o pelvis para conocer si su postura está siendo la ideal o debe ser corregida.

Este artículo se estructura como se indica a continuación. En la Sección 2 se explica de forma breve la técnica del lanzamiento de disco, sus fases y cuáles son los parámetros más determinantes en la calidad de un lanzamiento. En la Sección 3 se describe el sistema de captura de parámetros cinemáticos basados en el empleo de un conjunto de IMU distribuidos por el cuerpo del lanzador. En la Sección 4 se detalla el sistema de captura y tratamiento de vídeo basado en aprendizaje profundo y cómo la generación de un modelo de alambre en 3D del deportista permite, en combinación con los datos de las IMU, generar nuevos parámetros. En la Sección 5 se presentan algunos experimentos realizados con dos atletas y

para terminar se proporciona unas conclusiones y las líneas de continuación.

## 2. La técnica del lanzamiento de disco

El lanzamiento de disco es una de las disciplinas deportivas más antiguas de la humanidad (ya aparece citado en la *Iliada* y la *Odissea*). Básicamente consiste en que un atleta, desde un círculo de 2.50 m. de diámetro y sin salirse del mismo, lance un disco (1 kg. de peso y 18 cm. de diámetro para las mujeres, y 2 kg. y 22 cm. para hombres) y que el artefacto aterrice dentro de un sector de aproximadamente 35° con forma de cono. Como datos que dan una idea del nivel de técnica necesaria que requiere un lanzador de élite, el actual récord del mundo es 74.35 m. en hombres (2024) y 76.80 m. en mujeres (1988); el récord de España es 69.5 m. (2008) y 61.89 m. (2016) en hombres y mujeres, respectivamente. La duración de movimiento completo es inferior a los 1.5 s y la velocidad de salida del disco supera los 24 m/s en lanzamientos de más de 60 metros. Habitualmente, los entrenadores dan por bueno el dato de que es necesario emplear 10 años en formar a un buen lanzador, suponiendo además que sus condiciones físicas sean las más adecuadas para triunfar en esta disciplina deportiva (elevada estatura, amplia envergadura de brazos, gran potencia muscular y rapidez, buena coordinación).

Sin entrar en detalles sobre la técnica del lanzamiento, ésta ha ido evolucionando desde la conocida pose del discóbolo griego hasta la forma actual. Ésta consiste en realizar un movimiento rotatorio junto a una traslación durante los cuales se trata de llevar adelantada (o desacoplada) todo lo posible la parte inferior del cuerpo con respecto a la parte superior hasta el momento de la salida del disco de la mano del lanzador. Más detalles se pueden consultar en (Tidow, 1994).

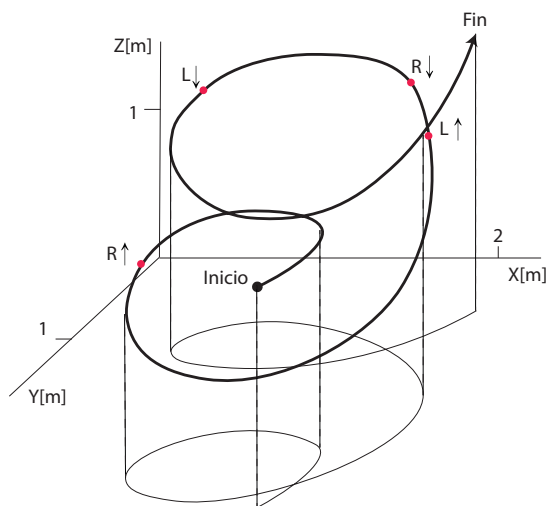


Figura 1: Recorrido rotatorio y lineal de un disco en la mano del lanzador. Adaptado de (Bartlett, 1992).

Este movimiento se puede dividir en cinco fases que se delimitan por los instantes de despegue ( $\uparrow$ ) y apoyo ( $\downarrow$ ) de los pies (Figura 1): fase de doble soporte, 1ª fase de apoyo simple ( $R\uparrow$ ), fase de vuelo o de no soporte ( $L\uparrow$ ), 2ª fase de apoyo simple ( $R\downarrow$ ) y fase de liberación o entrega ( $L\downarrow$ ). La duración de cada fase, expresada como porcentaje de la duración total del lanzamiento, es un parámetro que se suele medir en la

literatura, recurriendo únicamente al análisis de vídeos. Sin embargo, hay estudios que indican que su correlación con la distancia del lanzamiento no es muy relevante (Panoutsakopoulos and Kollias, 2012) (Chen *et al.*, 2021) aunque sí hay un consenso en que la fase de vuelo debe ser mínima para evitar la pérdida de velocidad (Barlett, 1992). En la Figura 2 se representan estas cinco fases.

El rendimiento de un lanzamiento depende de factores aerodinámicos asociados al disco y de biomecánicos asociados al lanzador. La Figura 3 presenta un esquema con estos factores. Entre los factores aerodinámicos sobre los que el atleta tiene control están la velocidad, altura y ángulo específico del disco en el instante de su liberación; la velocidad y el ángulo de liberación del disco no son independientes y se consideran variables muy importantes, especialmente, la velocidad ( $>24$  m/s en la élite).

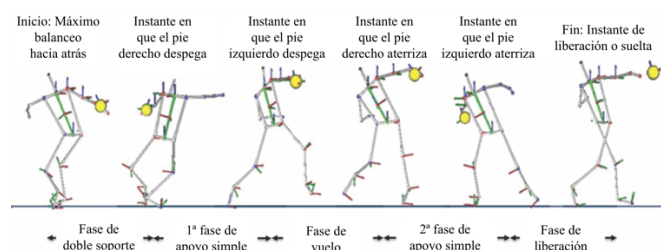


Figura 2: Las fases del lanzamiento (Chen *et al.*, 2021).

Además, todos los lanzadores de alto nivel tienen personalizado su ángulo de liberación óptimo y se encuentra entre 25° y 40°, siendo 35° el más común (Leigh *et al.*, 2010). Otro factor relevante al que no se presta especial atención debido a la dificultad de su medida, pero que certifican su relevancia los estudios teóricos sobre su aerodinámica (Soong, 1976), es maximizar la velocidad angular del disco durante el vuelo en su eje Z ( $>5$  Hz) pero tratar de que sea cero en X e Y. Ésta rotación tiene su origen durante la fase de entrega ya que el atleta provoca que el disco, antes de liberarse, rote en su mano pero sobre su propio eje vertical mediante el dedo índice. Esta contrarrotación se expresa en grados y es opuesta al sentido de giro del brazo del lanzador.

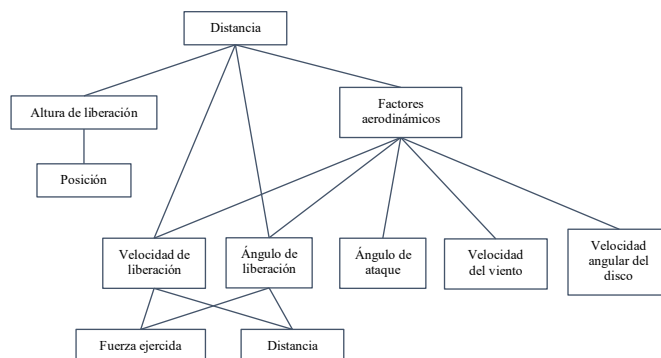


Figura 3: Factores básicos de un lanzamiento de disco (Hay, 1993).

En lo que respecta a los parámetros biomecánicos, todos ellos se derivan de la fuerza ejercida por el atleta desde los pies y transmitida hasta el brazo ejecutor a través de la cadena cinemática piernas-caderas-tronco durante las cinco fases.

Al tratarse de un movimiento fundamentalmente rotacional, el conocer los ángulos de desfase entre las partes específicas del cuerpo al comienzo de cada fase es clave. Así, parámetros estudiados son el ángulo entre el eje de caderas y la línea de pies, el ángulo entre el eje de hombros y el eje de caderas, el ángulo entre el miembro superior ejecutor y el eje de caderas, el ángulo entre el miembro superior ejecutor y el eje de hombro, el ángulo de inclinación del tronco y el ángulo de elevación y rotación del brazo ejecutor (Ferro y Floría, 2007).

Sin embargo, para entender cómo se genera la velocidad de salida del disco, es necesario comprender las relaciones mecánicas existentes entre el movimiento del lanzador, las fuerzas aplicadas por el lanzador y la velocidad del disco. Al observar el momento angular se comprende mejor la mecánica de lo que sucede durante el lanzamiento: la interacción de la fuerza entre el lanzador y el suelo determina la generación (o la pérdida) del momento angular para el sistema de lanzador+disco; la interacción de la fuerza entre el lanzador y el disco determina la transferencia del momento angular del lanzador al disco o viceversa (Maheras, 2022). Hasta ahora, el cálculo de este parámetro ha sido escaso dada su complejidad ya que requiere conocer el centro de masa de los segmentos del cuerpo del atleta, calcular sus momentos de inercia tomando como aproximaciones cilindros o paralelepípedos y sus velocidades angulares. Para el cálculo actual, en la literatura consultada se ha recurrido a la combinación de vídeo y cineantropometría (Dapena y Anderst, 1997) (Dapena *et al.*, 1997) (Liu and Yu, 2011)).

### 3. El sistema de medida inercial

Tal y como se ha indicado, el sistema basa su funcionamiento en las medidas inerciales proporcionadas por un conjunto de IMU y los datos de posición obtenidos del análisis de grabaciones de vídeo. Como sistema de medida inercial se ha seleccionado la plataforma de desarrollo Movella DOT (<https://www.movella.com/products/wearables/movella-dot>). Este producto consiste en un conjunto de IMU de 9 ejes (denominadas DOTs) diseñado para registrar datos cinemáticos del cuerpo humano hasta una frecuencia máxima de 120 Hz. Algunas de sus características más relevantes se presentan en la Figura 4. Un kit de 5 sensores tiene un precio de alrededor de 700 euros.

3-axis gyroscope:	Standard full range: ±2000 deg/s	IP-rating:	IP68
3-axis accelerometer:	Standard full range: ±16 g	Dimensions:	36.3 x 30.35 x 10.8 mm
3-axis magnetometer:	Standard full range: ±8 Gauss	Weight:	11.2 g
		Battery:	70 mAh – Up to 8 hours in continuous use
		Bluetooth:	5.0 or above



Figura 4: Especificaciones básicas, kit de 5 unidades DOT y detalle del sistema de referencia local de una unidad.

En el estado actual de desarrollo, el máximo número de DOTs que se utiliza con un atleta son 6 unidades ubicadas en tobillos, muñeca del brazo ejecutor, sacro, manubrio y disco, siendo el mínimo número necesario el DOT de la muñeca del brazo ejecutor. Las medidas que registran los sensores en cada lanzamiento son las aceleraciones lineales y las velocidades angulares (ambas locales al sistema de referencia del sensor) junto con los ángulos de orientación. En el estado actual de desarrollo, el análisis directo de esta información permite conocer los instantes de apoyo y despegue de los pies (y con ellos, las duraciones de las cinco fases), el inicio y final del movimiento del lanzador (y con ello la duración total), la velocidad de rotación del disco en vuelo, la cantidad de *spining* aplicado al disco (medida no proporcionada hasta ahora en ningún trabajo consultado), los grados de desfase entre el brazo ejecutor, la línea de hombros y la línea de caderas, el grado de inclinación de la cadera y del tronco, y los ángulos de elevación del brazo ejecutor y del disco en el instante de liberación.

Tras diferentes pruebas, para determinar los instantes de despegue, se han desarrollado algoritmos de detección de estos eventos analizando los máximos y mínimos de las aceleraciones lineales en el eje Y de los sensores ubicados en los tobillos al ser el movimiento de las piernas principalmente horizontal (debido a que se lanza la pierna hacia adelante). Para determinar los apoyos, los procedimientos de detección son análogos, pero estudiando las deceleraciones en el eje X (frenado provocado por el aterrizaje del pie en el suelo). Para obtener los grados de desfase brazo-cuello-tronco observados desde un plano cenital (el plano XY terrestre) se recurre a proyectar un vector unitario local al sistema de referencia del sensor ( $\langle 1,0,0 \rangle$  para el sensor de la muñeca y  $\langle 0,0,1 \rangle$  para los del sacro y el manubrio) sobre el plano XY de la tierra; las coordenadas cartesianas obtenidas se convierten a polares permitiendo así conocer los desfases angulares entre sensores en cualquier instante del lanzamiento.

Además, con las mediadas antropométricas del lanzador o en base a la información proporcionada por el vídeo es posible derivar parámetros biomecánicos adicionales. Así, se puede obtener la velocidad resultante del disco en la liberación partiendo de su velocidad angular y del radio de giro del conjunto lanzador+disco, o, en ausencia del sensor del disco, derivarla únicamente con el sensor de la muñeca ya que su velocidad angular es similar a la del disco.

Para la captura de datos durante un experimento se emplea la propia aplicación del fabricante que permite calibrar los sensores, sincronizarlos y alinear sus sistemas de referencia al mismo marco de referencia de la tierra. Los datos se exportan en formato .csv en un fichero por sensor y son procesados en Matlab, que es el software que se utiliza en esta fase de desarrollo para visualización y análisis. El producto final se entregará en Python para su ejecución en dispositivos móviles (tabletas y móviles).

### 4. El sistema de vídeo

Como complemento a los datos obtenidos por las IMU se han obtenido los datos de posición del lanzador mediante el análisis de vídeo usando una cámara. La razón de usar una única cámara, en contraposición con sistemas de alta precisión que usan múltiples cámaras repartidas espacialmente en la



zona de interés, es mantener al mínimo la complejidad del sistema y que pueda ser utilizado de forma sencilla por cualquier entrenador sin necesidad de equipos especiales.

Para el análisis de la grabación se ha utilizado la librería Mediapipe (Lugaresi *et al*, 2019) y disponible en acceso abierto (Mediapipe Pose, 2024). El análisis de vídeo proporciona para cada frame 33 posiciones de diferentes partes del cuerpo, de las cuales 23 son relevantes para definir el modelo de alambre del deportista con sus correspondientes segmentos corporales, véase la Figura 5. Estas posiciones o coordenadas están normalizados entre 0 y 1 en función del ancho y alto de la imagen, por lo que deben usarse las medidas antropométricas del lanzador para obtener las coordenadas espaciales absolutas. También es importante remarcar la incertidumbre introducida en la coordenada Y (profundidad de la imagen) debido al uso de una sola cámara, y cuya compensación se realiza también mediante las medidas antropométricas del lanzador.

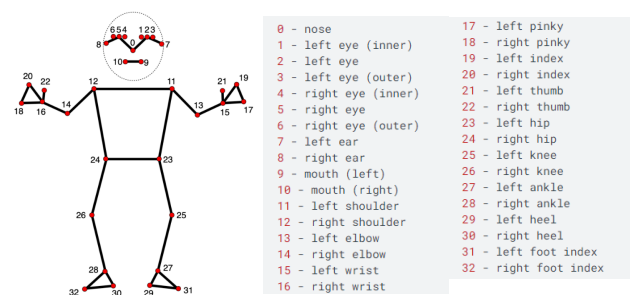


Figura 5: Modelo y puntos de referencia obtenidos mediante el análisis de vídeo (Mediapipe Pose, 2024).

De este modo, analizando cada frame del vídeo, y realizando un seguimiento de los puntos obtenidos para evitar ambigüedades que puedan surgir por el uso de una única cámara, se obtiene la secuencia completa de los puntos corporales clave del atleta durante el lanzamiento. En la Figura 6 se puede apreciar el modelo obtenido para un frame particular de una secuencia de lanzamiento.

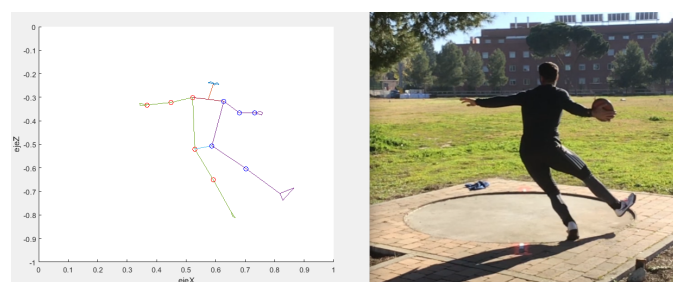


Figura 6: Representación de los puntos de referencia del atleta durante el lanzamiento.

Con las posiciones de los 23 puntos se procede al cálculo de los centros de masas de los 14 segmentos corporales y del global del lanzador recurriendo para ello al método de la segmentación (Hay, 1993). Tras esto ya es posible calcular el momento angular del conjunto lanzador+disco utilizando una aproximación del momento de inercia de todo el conjunto. Para ello, es necesario calcular primero el momento de inercia de cada segmento con respecto a un eje de revolución vertical

imaginario que atravesase al lanzador (se aplica el teorema de Steiner); como aproximación se considera a cada segmento como un cilindro inclinado (el diámetro y longitud son parámetros propios de cada lanzador) cuyo eje local de rotación es paralelo al vertical del lanzador y pasa por el centro de masas que previamente se ha obtenido. Tras esto, el sumatorio de todos ellos nos proporciona el momento de inercia del conjunto. Como velocidad angular global se utiliza la proporcionada por el sensor ubicado en el sacro.

## 5. Resultados experimentales

La Tabla 1 muestra las características de los lanzadores varones con los que se han realizado las pruebas iniciales. Se trata de atletas que lanzan de forma regular más de 55 m. y tienen patrones de movimiento diferentes, lo que permite validar los algoritmos de detección de eventos que se están diseñando.

Tabla 1: Características de los dos lanzadores.

Atleta	Peso	Talla	Edad
A	105	1.94	25
B	110	1.99	23

La Figura 7 presenta un ejemplo de datos obtenidos tras un lanzamiento. La Figura 8 corresponde al mismo lanzamiento y muestra las aceleraciones lineales del disco y de la muñeca; los símbolos en las gráficas “o” representan el inicio y el final del movimiento, los “^” el despegue del pie derecho e izquierdo y los “v” el apoyo del pie derecho e izquierdo. En este punto, es necesario destacar que las duraciones de las 5 fases en las señales no coinciden exactamente con las duraciones medidas en un vídeo; ello es debido a que en un vídeo puede observarse el contacto del pie con el suelo, pero puede suceder que, en ese instante, pese al contacto, ya no se esté ejerciendo fuerza, que es lo que detectan los acelerómetros. En la gráfica de los ángulos de la Figura 8 se aprecian los 21.27° de spinning aplicados al disco (es la diferencia entre el círculo azul y el máximo de la señal en  $t=7$  s que es cuando el disco cambia su sentido de rotación con respecto al de la mano); este parámetro nunca antes se había podido medir pese a la influencia que tiene en el vuelo del disco.

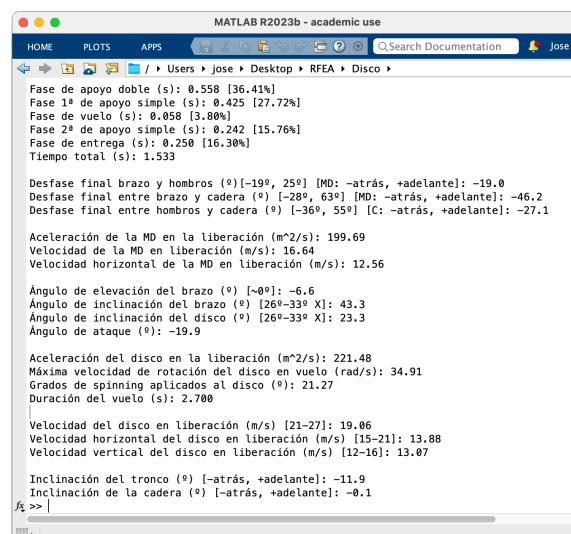


Figura 7: Parámetros obtenidos de un lanzamiento.

## Conclusiones

Lo expuesto en esta contribución representa el estado actual en que se encuentra el desarrollo de un sistema portátil y de bajo coste para ayudar a lanzadores de disco y a sus entrenadores a mejorar sus resultados. Dada su situación actual, los resultados obtenidos son prometedores, siendo ya en esta versión inicial de utilidad para los entrenadores. Algunos de los problemas más inmediatos para resolver son: (1) validar los algoritmos de detección de eventos con más atletas de élite masculinos ya que los patrones de las aceleraciones pueden variar; (2) experimentar con atletas femeninas, las cuales tienen patrones de lanzamiento diferentes a los de los hombres; (3) estudiar el problema de colocación de los sensores en el cuerpo del atleta dado que una mala alineación o su desplazamiento durante el lanzamiento implica que los resultados no sean exactos; (4) mejorar el tratamiento de vídeo introduciendo 2 cámaras para obtener medidas más exactas. Y, por último, todas las medidas deben ser contrastadas en un centro dotado de sistemas de cineantropometría de precisión basada en cámaras de alta velocidad y/o radares.

Concluida la herramienta para la ayuda al lanzamiento de disco, se prevé adaptarla a otras disciplinas atléticas que se basan en el movimiento rotatorio como son el lanzamiento de martillo y el de peso.

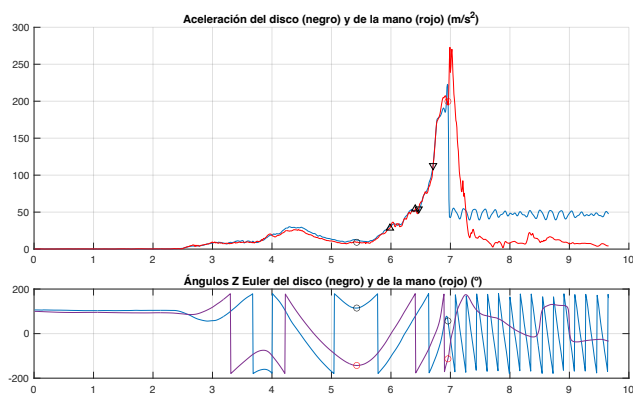


Figura 8: Gráfica con las aceleraciones lineales del disco y de la muñeca y de los ángulos de orientación.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Consejo Superior de Deportes y a la Real Federación Española de Atletismo por permitirnos acceder a sus instalaciones y a sus deportistas para la realización de los ensayos.

## Referencias

Badura, M., 2010. Biomechanical analysis of the discus at the 2009 IAAF World Championships Athletics. *New Studies in Athletics* 3/4/2010, 23-35.

- Balmer, N., Pleasence, P., Nevill, A., 2012. Evolution and revolution: Gauging the impact of technological and technical innovation on olympic performance. *Journal of Sports Sciences* 30(11), 1075-1083. DOI: 10.1080/02640414.2011.587018
- Bartlett, R.M., 1992. The biomechanics of the discus throw: A review. *Journal of Sports Sciences* 10(5), 467-510. DOI: 10.1080/02640419208729944
- Brice, S.M., Hurley, M., Phillips, E.J., 2018. Use of inertial measurement units for measuring torso and pelvis orientation, and shoulder-pelvis separation angle in the discus throw. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 13(6), 985-992. DOI: 10.1177/1747954118778664
- Chen, C.F., Wu, H.J., Yang, Z.S., Chen, H., Peng, H.T., 2021. Motion analysis for jumping discus throwing correction. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18, 13414. DOI: 10.3390/ijerph182413414
- Dapena, J., Anderst, W. J., 1997. Discus throw #1 (Men). Report for Scientific Services Project (USATF). Indianapolis: USA Track and Field.
- Dapena, J., LeBlanc, M.K., Anderst, W. J., 1997. Discus throw #2 (Women). Report for Scientific Services Project (USATF). Indianapolis: USA Track and Field.
- Ferro, A., Floría, P., 2007. La aplicación de la biomecánica al entrenamiento deportivo mediante los análisis cualitativo y cuantitativo. Una propuesta para el lanzamiento de disco. *Revista Internacional de Ciencias del Deporte* 7(3), 49-80. DOI: 10.5232/ricyde2007.007.05
- Flockhart, M., Larsen, F.J., 2023. Continuous glucose monitoring in endurance athletes: Interpretation and relevance of measurements for improving performance and health. *Sports Medicine*. DOI: 10.1007/s40279-023-01910-4
- Gregor, R.J., Whiting, W.C., McCoy, R.W., 1985. Kinematic analysis of Olympic discus throwers. *International Journal of Sport Biomechanics* 1(2), 131-138. DOI: 10.1123/ijbs.1.2.131
- Hay, J.G., Yu, B., 1995. Critical characteristics of technique in throwing the discus. *Journal of Sports Sciences* 13(2), 125-140. DOI: 10.1080/02640419508732220
- Hay, J.G., 1993. *The biomechanics of sports techniques*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Leigh, S., Liu, H., Hubbard, M., Yu, B., 2010. Individualized optimal release angles in discus throwing. *Journal of Biomechanics* 43(3), 540-545. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.09.037
- Liu, J., Wang, J., Zhao, Y., Zhao, Q., Li, J., Dongxue, C., 2011. Research on the application of the three-dimensional information collection system of digital discus to the throwing technique of the discus throwers. *International Conference on Future Computer Science and Education*, 196-199. DOI: 10.1109/ICFCSE.2011.56
- Liu, H.; Yu, B., 2021. Rotation of the thrower-discus system and performance in discus throwing. *Sports Biomechanics*. DOI: 10.1080/14763141.2021.1880619.
- Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M., 2019. Mediapipe: A framework for perceiving and processing reality. *3<sup>rd</sup> Workshop on Computer Vision for AR/VR at IEEE computer vision and pattern recognition (CVPR)*.
- Maheras, A., 2022. Generating speed. *Momentum analysis in discus throwing. Techniques for Track & Field and Cross Country* 15(4), 34-42.
- Mason, R., Pearson, L. T., Barry, G., Young, F., Lennon, O., Godfrey, A., Stuart, S., 2023. Wearables for running gait analysis: A systematic review. *Sports Medicine* 53(1), 241-268. DOI: 10.1007/s40279-022-01760-6
- MediaPipe Pose. Available online: [https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/pose\\_landmarker](https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/pose_landmarker) (accessed on 1 March 2024).
- Navarro-Iribarne, J.F., Moreno-Salinas, D., Sánchez-Moreno, J., 2022. Low-cost portable system for measurement and representation of 3D kinematic parameters in sport monitoring: discus throwing as a case study. *Sensors* 22(23), 9408. DOI: 10.3390/s22239408
- Panoutsakopoulos, V., Kollias, I.A., 2012. Temporal analysis of elite men's discus throwing technique. *Journal of Human Sport and Exercise*, 7(4), 826-836. DOI: 10.4100/jhse.2012.74.10
- Soong, T., 1976. The Dynamics of discus throw. *ASME. Journal of Applied Mechanics* 43(4), 531-536. DOI: 10.1115/1.3423924
- Tidow, G., 1994. Model technique analysis sheets. Part IX: The discus throw. *New Studies in Athletics* 9(3), 47-68.
- Wang, L., Hao, L., Zhang, B., 2022. Kinematic diagnosis of throwing motion of the chinese elite female discus athletes who are preparing for the Tokyo Olympic games. *Journal of Environmental and Public Health* 2022. DOI:10.1155/2022/3334225