



ESTIMACIÓN DE LA ALTURA EN EL TEST DE SALTO VERTICAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESADO DE SONIDO

Maria del Carmen Espert Bosch

Tutor: José Javier López Monfort

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 2 de julio de 2019



Resumen

La altura del salto vertical se utiliza para la medida de la potencia muscular de las extremidades inferiores de los atletas. Resulta útil en diversos deportes para evaluar el progreso en el rendimiento deportivo. Existen diversos instrumentos para evaluar la altura y potencia alcanzada en el salto, clasificándose fundamentalmente en dos tipos, los basados en el tiempo de vuelo y los no basados en dicho tiempo. Los más populares son los basados en el tiempo de vuelo, a partir del cual calculan la altura alcanzada teniendo en cuenta la fuerza de la gravedad. Estos métodos suelen emplear plataformas con sensores que tienen un cierto coste y complejidad. En este proyecto se ha desarrollado un método novedoso, que empleando simplemente un teléfono móvil y analizando los sonidos de despegue y aterrizaje del atleta, calcula el tiempo de vuelo y extrapola la altura alcanzada.

Resum

L'altura del bot vertical s'utilitza per a la mesura de la potència muscular de les extremitats inferiors dels atletes. Resulta útil en diversos esports per a avaluar el progrés en el rendiment esportiu. Hi ha diversos instruments per a avaluar l'altura i potència aconseguida en el bot, classificant-se fonamentalment en dos tipus, els basats en el temps de vol i els no basats en el dit temps. Els més populars són els basats en el temps de vol, a partir del qual calculen l'altura aconseguida tenint en compte la força de la gravetat. Estos mètodes solen emprar plataformes amb sensors que tenen un cert cost i complexitat. En este projecte s'ha desenrotllat un mètode nou, que emprant simplement un telèfon mòbil i analitzant els sons d'envol i aterratge de l'atleta, calcula el temps de vol i extrapola l'altura aconseguida.

Abstract

The height of the vertical jump is used to measure the muscular power of the lower extremities of the athletes. It is useful in various sports to assess progress in sports performance. There are several instruments to evaluate the height and power reached in the jump, classifying basically in two types, the means in the time of flight and not in this time. The most popular are the results in the time of flight, from which the height reached is calculated taking into account the force of gravity. These methods usually employ platforms with sensors that have a certain cost and complexity. In this project, a novel method has been developed, which simply uses a mobile phone and analyzes the athlete's take-off and landing sounds, calculates flight time and extrapolates the height reached.



Índice

Capítulo 1.	Introducción y objetivos.....	2
1.1	Introducción.....	2
1.2	Objetivos.....	3
Capítulo 2.	El salto vertical: Fundamentos y métodos.	4
2.1	El salto vertical con contramovimiento	4
2.2	Métodos para el cálculo de la altura del salto vertical	6
2.2.1	Métodos no basados en el tiempo de vuelo	6
2.2.2	Método basado en el tiempo de vuelo.....	9
2.3	Dispositivos para la medición de la altura del salto vertical	9
Capítulo 3.	Procedimiento experimental.....	13
Capítulo 4.	Procesado de sonido	16
Capítulo 5.	Optimización de los parámetros del algoritmo	19
Capítulo 6.	Algoritmo final para la extracción del tiempo de vuelo	21
Capítulo 7.	Análisis Estadístico de los Resultados	22
Capítulo 8.	Conclusiones	24
8.1	Desarrollos Futuros.....	25
Capítulo 9.	Bibliografía	26

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

La altura del salto es comúnmente utilizada para la medida de la potencia muscular de las extremidades inferiores [1] y la coordinación de las extremidades superiores e inferiores [2]. Para las personas atléticas y no atléticas, los profesionales del deporte pueden estudiar las cualidades neuromusculares y de rendimiento al monitorear los cambios en la altura del salto, que corresponden a las variaciones en el rendimiento funcional [3].

El número y la tipología de los instrumentos para evaluar la potencia de la parte inferior del cuerpo a través de las pruebas de salto vertical es considerable y se pueden clasificar en tres métodos. Primero, la altura del salto se puede obtener mediante la integración numérica de las fuerzas de reacción del suelo medidas con las placas de fuerza [4]. En segundo lugar, el centro de gravedad del cuerpo puede ser rastreado por la captura de movimiento biomecánico para seguir la excursión en ejecuciones de salto [5, 6]. Finalmente, el intervalo de tiempo entre el despegue y el aterrizaje puede transformarse en altura de salto mediante cinemática lineal básica con instrumentos de cronometraje que miden los tiempos de vuelo de los atletas [7].

Estos últimos instrumentos son muy populares entre los profesionales de los deportes debido a su facilidad de uso, portabilidad y bajo costo en comparación con los equipos de laboratorio como las placas de fuerza y los sistemas de captura de movimiento. La evaluación del tiempo de vuelo a partir de la cual se calcula el desplazamiento del centro de gravedad durante el vuelo (altura de salto) requiere instrumentos con una selección precisa de los eventos de despegue y aterrizaje [8]. Las esteras de salto, también conocidas como esteras de contacto, fueron los primeros instrumentos de este tipo, consistentes en una estera que funciona como un interruptor eléctrico, activada por la presión del peso del atleta [9]. Alternativamente, se introdujeron placas de fotocélulas como barras con una serie de diodos IR emisores alineados con una barra secundaria con diodos IR receptores para crear una barrera óptica que los atletas interrumpen cuando ejecutan saltos [10,11]. Más recientemente, las aplicaciones de teléfonos inteligentes que utilizan grabaciones de video de alta velocidad de las piernas de los atletas permiten a los usuarios seleccionar manualmente los fotogramas de despegue y aterrizaje a partir de los cuales calcular el tiempo de vuelo contando el número de fotogramas entre dichos eventos de tiempo [12]. Estas aplicaciones se han generalizado en las ciencias deportivas debido a las ventajas intrínsecas de los teléfonos inteligentes, como la portabilidad, la conectividad y el procesamiento de datos.

Sin embargo, si bien la estimación de la altura del salto a través del tiempo de vuelo es un procedimiento validado [9], hay una serie de inconvenientes en la digitalización manual de eventos por observación de video. La frecuencia de muestreo del sensor de imagen en los teléfonos inteligentes (fotograma de video por segundo, fps) es baja para la resolución temporal requerida para seleccionar los fotogramas clave que definen el tiempo de vuelo. Además, las fases de despegue y aterrizaje de un salto vertical muestran los valores de velocidad máxima de ejecución de salto [13], por lo que los valores típicos de 120 o 240 fps de videos en cámara lenta en los últimos modelos de iPhone resultan en un submuestreo. Además, el usuario no suele acceder a las velocidades de obturación, y su velocidad más rápida, que es de alrededor de 1/1000 s en los modelos avanzados de teléfonos inteligentes, se configura automáticamente



solo en escenas con mucha luz, como en la luz solar. En consecuencia, la mayoría de las pruebas de salto, que se realizan en interiores o en ambientes con poca iluminación, darán como resultado imágenes ligeramente borrosas de los pies en las fases de despegue y aterrizaje [14]. Todos estos problemas desempeñan un papel en la precisión de la medición, ya que la observación humana se combina con la selección del marco correcto. Por ejemplo, en el video de más alta velocidad de 240 fps, una inexactitud de observación de solo 1 fotograma en el despegue y el aterrizaje introduce un error de 0,9 cm para un salto de 30 cm. Aún así, si a los observadores se les proporcionaran imágenes sin fallas técnicas, surgirían desajustes de observación entre los diferentes observadores. Por ejemplo, las mediciones con dos observadores pueden mostrar errores diferentes, ya que uno puede hacer evaluaciones más precisas que el otro, pero también puede diferir sistemáticamente debido al sesgo entre observadores, o el llamado efecto observador [15]. Además, el resultado de dichos sistemas se logra después de una intervención humana para analizar los saltos manualmente, por lo que el proceso carece de la velocidad necesaria para las sesiones típicas que comprenden una gran cantidad de atletas sometidos a la prueba, ya que se tarda bastante en seleccionar los instantes de despegue y aterrizaje manualmente. Por lo tanto, las aplicaciones basadas en la digitalización manual por observación de video muestran varios inconvenientes como alternativas válidas a otros instrumentos, como las esterillas de salto.

1.2 Objetivos

Para superar los problemas técnicos y de observación asociados con la digitalización manual de grabaciones de video, se pretende desarrollar un instrumento no invasivo que utilice el sonido para detectar los eventos de despegue y aterrizaje.

Para ello se tienen en cuenta las siguientes hipótesis y requerimientos:

- Se parte de la hipótesis de que la caída del atleta produce un sonido fuerte sobre el suelo, y que el despegue produce un sonido más débil pero que puede aumentarse artificialmente de forma sencilla (se verá más adelante que esto se consigue con simple cinta adhesiva).
- A partir de la detección temporal precisa de los dos eventos es posible extraer el tiempo de vuelo por simple resta.
- El algoritmo a desarrollar debe ser “no supervisado”, es decir debe detectar automáticamente ambos eventos sin intervención del usuario, analizando el patrón de sonido para detectar instantes de despegue y aterrizaje en tiempo real mediante el procesamiento de la señal.
- Las capturas de sonido deben llevarse a cabo por medio de los micrófonos incorporados en los teléfonos inteligentes y el algoritmo final debe poder implementarse en los mismos.
- El algoritmo desarrollado deberá validarse mediante la comparación de los resultados obtenidos por el mismo frente a un instrumento profesional comercial, en concreto con una alfombra electrónica de salto de alta precisión.

Capítulo 2. El salto vertical: Fundamentos y métodos.

2.1 El salto vertical con contramovimiento

El salto vertical con contramovimiento se usa para medir la potencia de las extremidades inferiores. Al tratarse de una medida sencilla y fiable es muy utilizada por los profesionales del deporte para la realización de los test de altura de salto vertical. Se utiliza junto a diferentes dispositivos de medición de la altura del salto como plataformas de contacto, plataformas de fuerzas, encoders lineales o video análisis.

Mediante esta técnica se pretende alcanzar la máxima altura elevando el centro de masas verticalmente y realizando rápidamente una flexión y extensión de piernas permaneciendo el tronco lo más erguido posible. Las manos quedan pegadas a la cadera para que los brazos intervengan lo menos posible durante el salto. Es importante que el centro de masas se desplace verticalmente por lo que el saltador debe caer en la misma posición con las piernas y los pies extendidos. En la figura 1 tenemos una representación de los principales eventos que se producen durante la ejecución del salto vertical con contramovimiento y en la tabla 1 encontramos explicados con detalle cada uno de estos eventos.

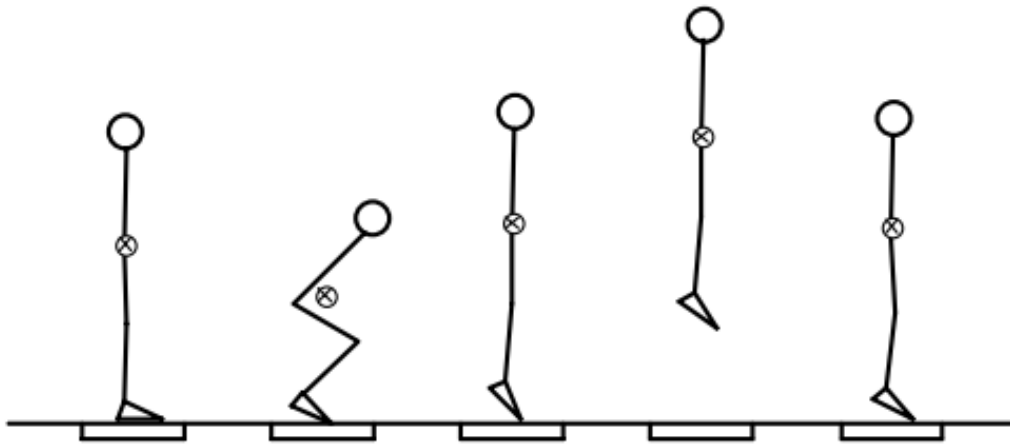


Figura 1. Secuencia de movimientos en el salto vertical con contramovimiento.(a) Posición inicial;(b) Fase de desaceleración ; (c) Fase de propulsión; (d) Fase de vuelo; (e) Posición final

(a)	El saltador se encuentra en la posición inicial. Permanece de pie y erguido encima de la plataforma de salto.
(a) / (b)	Se produce la fase de descenso en la que el saltador empieza a flexionar las rodillas y las caderas hasta un ángulo de aproximadamente 90º, manteniendo el tronco lo más próximo a la línea vertical. En esta fase el atleta adquiere una velocidad negativa al descender.
(b)	Se produce la fase de desaceleración en la que el atleta deja de acelerar y frena su centro de masas. Esta fase dura desde que se produce un pico negativo en la velocidad del atleta hasta que se reduce a cero.
(c)	Encontramos la fase de propulsión donde el atleta estira sus caderas, rodillas y tobillos para impulsar su centro de masas verticalmente adquiriendo una velocidad positiva .
(c) / (d)	Se produce la fase de despegue. En esta fase el saltador deja de tener contacto con el suelo.
(d)	Encontramos la fase de vuelo la cual empieza en el momento de despegue y termina en el momento de aterrizaje sobre el suelo. El atleta no tiene contacto con el suelo produciéndose un desplazamiento vertical positivo del centro de masas. En el momento en el que el centro de masas alcanza su valor positivo más grande, la velocidad se reducirá a cero y el atleta empezará a descender hasta tocar el suelo. Durante esta fase es importante que el atleta mantenga los pies y las piernas estiradas.
(f)	Se produce el aterrizaje, empieza cuando los pies entran en contacto con el suelo y finaliza en el momento en que la velocidad del centro de masas vuelve a ser cero. Es importante que el atleta no se mueva hacia los lados, hacia delante o hacia atrás y que caiga en la misma posición en la que realiza el despegue. Esto es debido a que el desplazamiento debe realizarse de forma vertical para que los resultados sean válidos.

Tabla 1. Descripción de las fases del salto vertical con contramovimiento

2.2 Métodos para el cálculo de la altura del salto vertical

2.2.1 Métodos no basados en el tiempo de vuelo

La altura del salto vertical se define como la diferencia entre la altura del centro de masas en el instante de despegue y el centro de masas en el pico más alto del salto. Principalmente hay tres métodos que no están basados en el tiempo de vuelo para calcular la altura del salto. Por una parte, nos encontramos dos métodos de los que obtenemos la velocidad de despegue del salto: el teorema del impulso mecánico y el teorema del trabajo y de la energía cinética. Por otra parte, una vez obtenida la velocidad de despegue aplicamos la ley de la conservación de la energía mecánica obteniendo la relación entre la velocidad de despegue y la altura del salto.

Teorema del impulso mecánico

Aplicando el teorema impulso mecánico se utilizan los impulsos realizados durante el salto en un intervalo de tiempo determinado para calcular la velocidad de despegue. El impulso se define como la integral de una fuerza en el intervalo de tiempo para el que actúa, por lo que será necesario conocer que fuerzas actúan sobre el saltador. Durante el salto vertical aparecen diversas fuerzas que actúan sobre el centro de masas del saltador. Según la tercera ley de Newton, principio de acción-reacción, se obtiene el valor de una fuerza ejercida sobre una superficie al hallar la fuerza que esta origina, con la misma dirección y magnitud, pero en sentido contrario. En la figura 2 observamos que el saltador ejerce una fuerza, F_A , sobre el suelo que según la tercera ley de Newton será igual a la fuerza de reacción que el suelo ejerce sobre el saltador, F_{GRF} . También aparece una fuerza debida al peso corporal, F_{BW} .

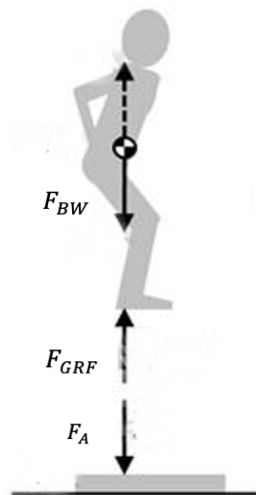


Figura 2. Fuerzas verticales durante el salto

Se realiza la integral de las fuerzas en el momento en que los pies del atleta están en contacto con el suelo, comenzando desde el instante en que el saltador está en reposo hasta el instante de despegue. Siendo t_i el instante inicial en que el saltador está en reposo, t_{to} el instante de despegue, F_{GRF} la fuerza de reacción del suelo que actúa sobre el saltador, v_{t0} la velocidad de despegue, m la masa del saltador y g la aceleración de la gravedad.

$$\int_{t_i}^{t_o} (F_{GRF} - mg) dt = mv_{to} \quad (2.1)$$

$$\int_{t_i}^{t_o} F_{GRF} dt - \int_{t_i}^{t_o} mg dt = J_{GRF} - J_{BW} = mv_{to} \quad (2.2)$$

El impulso debido a la fuerza resultante en el saltador puede considerarse como dos impulsos separados. Donde J_{GRF} es el impulso debido a la fuerza de reacción del suelo y J_{BW} es el impulso debido al peso corporal. Midiendo estos impulsos, a partir de (2.2) se obtiene cual es la velocidad de despegue del salto.

Teorema del trabajo y de la energía cinética

Otro método a partir del cual podemos obtener la altura del salto es mediante el teorema del trabajo y de la energía cinética. Aplicando el teorema en la fase de contacto con el suelo desde que el saltador está parado hasta el instante en que despegamos queda la ecuación (2.4). El resultado del trabajo lo consideramos como cada una de las dos fuerzas actuando sobre el saltador. Donde W_{GRF} es el trabajo que realiza el suelo sobre el saltador y W_{BW} es el trabajo realizado por la gravedad sobre el saltador.

$$\int_{y_i}^{y_{to}} (F_{GRF} - mg) dy = \frac{1}{2} mv_{to}^2 \quad (2.3)$$

$$\int_{y_i}^{y_{to}} F_{GRF} dy - \int_{y_i}^{y_{to}} mg dy = W_{GRF} - W_{BW} = \frac{1}{2} mv_{to}^2 \quad (2.4)$$

Ley de la conservación de la energía mecánica

Con los resultados de los métodos anteriores podemos obtener la altura del salto a partir de la velocidad de despegue que corresponde a la velocidad máxima. A partir de la ley de la conservación de la energía mecánica sabemos que la energía en el despegue será la misma que la energía en el punto más alto del salto. Se define la altura del salto como la resta entre la altura más alta alcanzada por el centro de masas, y_{pico} , y la altura que tenía este en la posición de despegue, y_{to} .

$$E_{to} = E_{pico}$$

$$\frac{1}{2} mv_{to}^2 + mgy_{to} = \frac{1}{2} mv_{pico}^2 + mgy_{pico}$$

Podemos cancelar la masa del atleta en ambos lados de la ecuación, quedando

$$\frac{1}{2} v_{to}^2 + gy_{to} = \frac{1}{2} v_{pico}^2 + gy_{pico}$$

En el punto más alto del salto la velocidad será cero, por lo que $v_{pico}=0$,

$$y_{pico} - y_{to} = \frac{v_{to}^2}{2g}$$

La altura del salto viene dada por la ecuación (2.5)

$$h = \frac{1}{2} * \frac{v_{to}^2}{g} \quad (2.5)$$

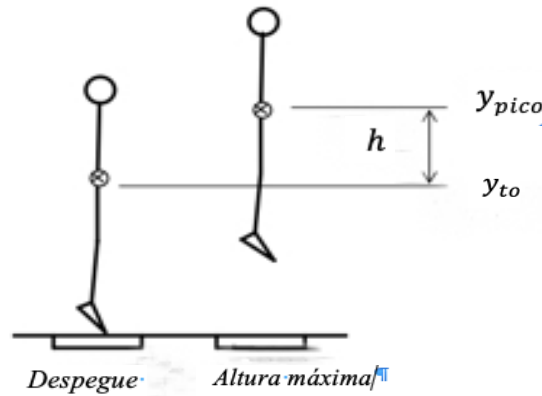


Figura 2. Posición de despegue y posición en la que se alcanza la máxima altura

En la figura 3 aparece un diagrama con los parámetros que son necesario calcular en los dispositivos que obtienen la altura del salto a partir de las fuerzas de reacción. Un ejemplo de este tipo de dispositivos las plataformas de fuerza.

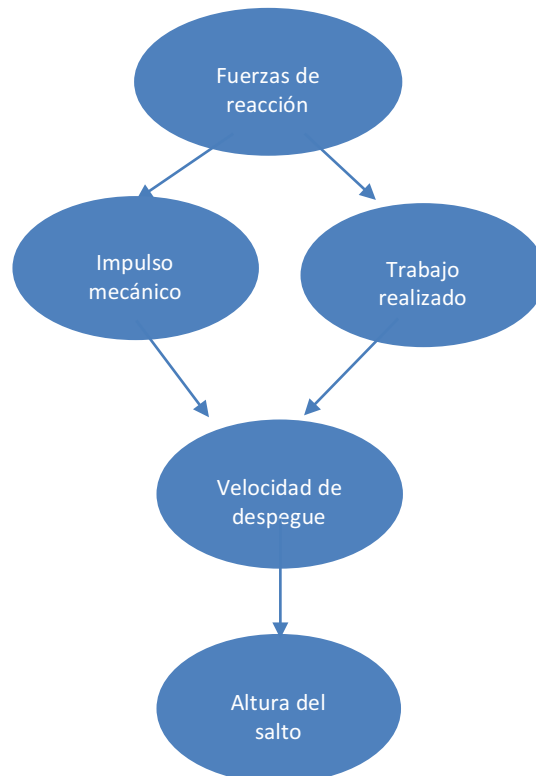


Figura 3. Obtención de la altura del salto a partir de las fuerzas de reacción

2.2.2 Método basado en el tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo es el instante de tiempo desde que los pies del atleta despegan del suelo hasta que vuelven a tener contacto con este, es decir, el tiempo durante el cual los pies del atleta no están en contacto con el suelo. La altura del salto corresponde con la altura máxima que se alcanza durante el salto que sucede en la mitad del salto. Por lo que integrando la velocidad desde el instante inicial hasta la mitad del tiempo de vuelo (equivale a la mitad del salto) obtenemos la altura del salto en función del tiempo de vuelo. Donde h_t es la altura del salto t_v es el tiempo de vuelo y a es la aceleración de la gravedad ($9,81\text{m/s}^2$).

$$h_t = \int_0^{\frac{1}{2} t_v} v(t) dt$$

$$h_t = \int_0^{\frac{1}{2} t_v} a * t dt$$

$$h_t = \frac{1}{2} a \left(\frac{t_v}{2}\right)^2$$

$$h_t = \frac{g(t_v)^2}{8} \quad (2.4)$$

Como hemos podido comprobar resulta más sencillo calcular la altura a partir del tiempo de vuelo ya que no es necesario el uso de fuerzas como que era necesario para algunos de los métodos vistos en el apartado anterior.

2.3 Dispositivos para la medición de la altura del salto vertical

Los dispositivos para la medición de la altura del salto vertical se basan en los métodos vistos anteriormente para obtener la altura del salto. A continuación, vamos a ver algunos de los dispositivos más utilizados con este fin.

Plataformas dinamométricas de fuerza

Las plataformas dinamométricas de fuerza son sistemas de análisis que permiten medir las fuerzas ejercidas sobre el plano de apoyo durante el salto. El saltador ejercer una fuerza sobre la plataforma dinamométrica la cual produce una señal eléctrica proporcional a la fuerza que se ha aplicado, obteniendo el valor del impulso. Se determina la velocidad máxima a partir del teorema del impulso mecánico. Por último, la relación entre la velocidad máxima y la altura del salto se obtiene a partir de la ley de la conservación de la energía mecánica. También se puede calcular la altura mediante el tiempo de vuelo, tiempo durante el cual se deja de ejercer fuerza sobre la plataforma. A pesar de que se consideran como dispositivos de referencia no se usan mucho debido a su alto coste y complicado transporte.

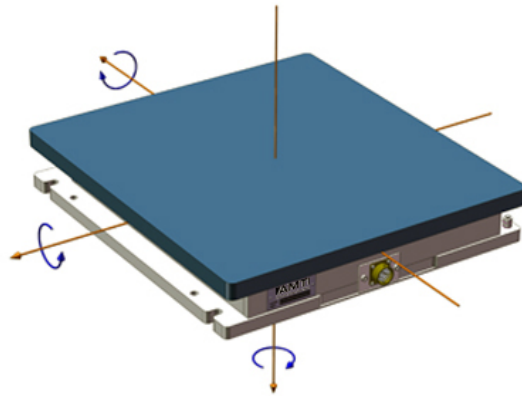


Figura 4. Plataforma dinamométrica de fuerza

Plataformas de contacto

Las plataformas de contacto son alfombrillas formadas por varillas metálicas separadas la misma distancia unas de otras. Estas varillas funcionan como un pulsador que se activa al detectar que el saltador está subido en ella y se desactiva cuando no hay contacto sobre ellas. Además, es necesario conectar un microcontrolador y un software que permiten registrar el tiempo en que el saltador deja de tener contacto en la plataforma deduciéndose a partir de este la altura del salto.



Figura 5. Plataforma de contacto Chronojump

Encoders lineales

Los encoders son transductores lineales que tienen un cable extensible que nos permite medir el desplazamiento realizado en línea recta. El hilo se engancha a una barra en los hombros del saltador obteniendo la altura del salto a partir de los valores de posición de la barra.



Figura 6. Encoder lineal Chronojump

Análisis de movimiento 3D

El análisis de movimiento en 3D consiste en un sistema de captura del movimiento que mediante un conjunto de cámaras sincronizadas de alta resolución analizan los datos cinemáticos a través de un software. Con este sistema es posible medir la altura del salto a partir del tiempo de vuelo.

Video análisis mediante aplicaciones para smartphone

Otra forma más novedosa para medir la altura del salto es mediante el video grabado a través de aplicaciones para smartphones. Se necesitan cámaras de alta resolución para poder capturar de forma más precisa mediante el video los instantes claves del salto. Necesitan de una selección manual por parte del observador de los fotogramas que corresponden al momento de despegue y aterrizaje. Estas aplicaciones utilizan la ecuación del tiempo de vuelo para obtener la altura del salto.

Los distintos métodos para la medición de la altura del salto vistos anteriormente se utilizan en los dispositivos que existen actualmente en el mercado para la medida de la altura del salto vertical. En la tabla están clasificados según los métodos que utilizan hasta conseguir calcular la altura del salto.



Tipo de dispositivo	Medida directa	Medida indirecta	Medida doble indirecta
Plataforma de contacto	Tiempo de vuelo Tiempo de contacto	Altura del salto	-
Plataforma por infrarrojos	Tiempo de vuelo Tiempo de contacto	Altura del salto	-
Plataforma de fuerza	Fuerza Tiempo	Velocidad máxima Tiempo de vuelo	Altura del salto
Acelerómetro	Aceleración en 3 ejes Tiempo	Velocidad vertical máxima Aceleración vertical	Tiempo de vuelo Altura del salto
Video-análisis (smartphones apps)	Tiempo entre los fotogramas, con una selección manual	Tiempo de vuelo	Altura del salto

Tabla 1. Método de cálculo de la altura del salto según dispositivo

Capítulo 3. Procedimiento experimental

Para llevar a cabo el objetivo del proyecto se deben grabar los saltos de los atletas utilizando un sistema de captura de audio para registrar la onda de sonido generada por un atleta al ejecutar un salto vertical. El objetivo era extraer automáticamente las fases de despegue y aterrizaje, por lo que el micrófono debe estar cerca de los pies del atleta para grabar el sonido. Se ha utilizado directamente el micrófono del teléfono móvil para hacer la grabación, para que los resultados sean totalmente realistas pensando en la implementación posterior del algoritmo en una APP.

Para identificar la fase de despegue que es más silenciosa, una pieza de cinta adhesiva se pega a la suela del zapato y al piso simultáneamente para crear un patrón de sonido único. La resistencia creada por dicho elemento es insignificante en comparación con la fuerza ejercida en el despegue. La fase de aterrizaje se identifica por el pico de presión sonora creado cuando los pies tocan el suelo. La figura 7 muestra el esquema básico del sistema de captura del sonido utilizando un smartphone. El smartphone reposa en el suelo a una distancia de entre 20 y 50 centímetros del atleta.

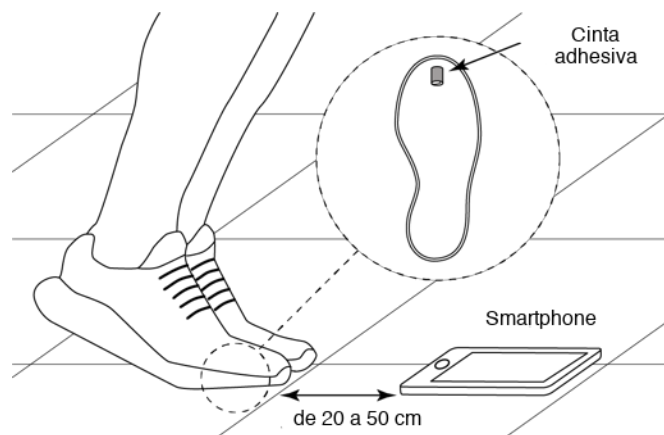


Figura 7. Esquema del set-up para las grabaciones con el micrófono del samrtphone

Se usaron tres teléfonos inteligentes diferentes para evitar cualquier efecto de sobrealimentación en el algoritmo de procesamiento de señal al micrófono y la electrónica de audio del teléfono inteligente. La frecuencia de muestreo se ajustó a 48,000 Hz y las señales de audio sin procesar se transfirieron a una computadora (Core i7, Windows 10) para su análisis. Las señales se registraron en diferentes escenarios intentando reproducir las condiciones típicas de las instalaciones relacionadas con el deporte real: salas de ejercicios, gimnasios y similares. Además de esto, los pasillos y las oficinas también se probaron como lugares de registro para un análisis exhaustivo. Algunos escenarios muestran baja reverberación y ruido de fondo, como habitaciones pequeñas, pero otras ubicaciones como gimnasios tienen tiempos de reverberación típicamente largos y generalmente más ruido de fondo.

Para probar la precisión de los resultados, todas las ejecuciones de saltos se midieron simultáneamente con un sistema de esterilla de salto validado (Chronojump). Es decir, el sujeto saltaba sobre una plataforma de salto conectada al ordenador que registraba la altura del salto

mediante sensores de presión al mismo tiempo que el teléfono móvil capturaba el sonido en un archivo WAV para su posterior análisis mediante algoritmos de procesado de señal.

La plataforma de contacto Chronojump, es una plataforma comercial de alta precisión, la cual mide la altura del salto al detectar cuando se elevan los pies de la plataforma y cuando vuelven a caer calculando de esta forma el tiempo de vuelo. En la figura 8 se encuentra el circuito integrado que se conecta a la plataforma, Chronopic, el cual permite a través de una conexión USB obtener los resultados de las medidas realizadas con el sensor al software en el PC. Del mismo modo va conectado a la plataforma a través de una conexión RCA. Este detecta los cambios de estado que se producen en la plataforma.

En el software de Chronojump se gestionan en una base de datos todos los resultados de las sesiones de saltos realizadas con la plataforma. Las medidas de los saltos realizados durante el estudio fueron exportadas en una hoja Excel para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada.



Figura 8a. Plataforma de contacto Chronojump

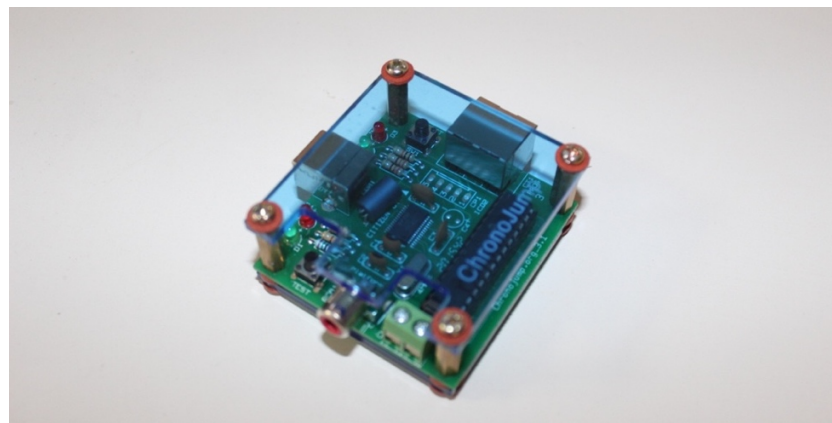


Figura 8b. Circuito integrado Chronopic

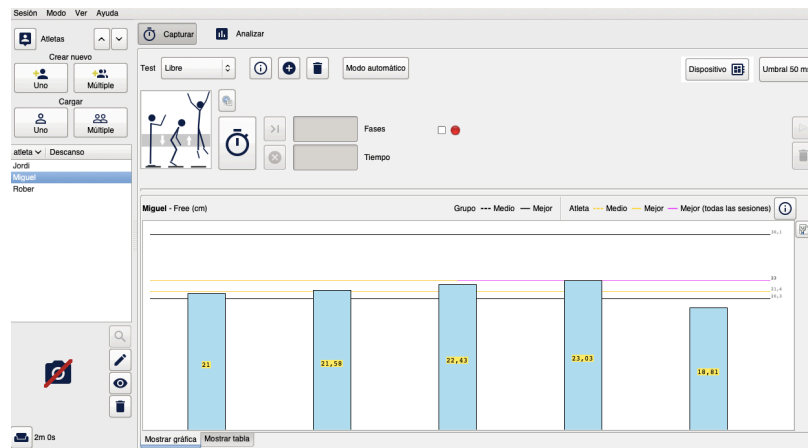


Figura 9. Captura del software Chronojump



Capítulo 4. Procesado de sonido

La clasificación y detección de eventos de audio ha sido un campo de investigación activo en los últimos años [17,18]. Tanto la clasificación como la detección se utilizan en este trabajo, el primero para distinguir el despegue del aterrizaje y el segundo para detectar con precisión en el tiempo la ocurrencia de ambos eventos. Aunque se ha aceptado que la clasificación de eventos de audio es más fácil de manejar que la detección, los trabajos recientes enfatizan la importancia de la detección [19], que particularmente en este trabajo es de gran importancia. De hecho, como veremos más adelante, distinguir el despegue del aterrizaje será sencillo, pero el esfuerzo se pondrá en una detección precisa del tiempo. Además, la reverberación y el ruido de fondo en escenarios típicos relacionados con el deporte pueden ser grandes inconvenientes. Además de esto, el algoritmo debe poder procesar y dar la altura de salto automáticamente en tiempo real.

Por lo tanto, las características del algoritmo a desarrollar deben ser:

- Buena inmunidad al ruido de fondo.
- Independiente del tiempo de reverberación del escenario.
- Complejidad moderada para ser utilizada en tiempo real en teléfonos inteligentes.
- Totalmente sin supervisión

Las señales de entrenamiento se registraron en diferentes escenarios para probar el algoritmo contra varios niveles de reverberación y ruido de fondo. Para calcular el tiempo de vuelo, el algoritmo debe ser capaz de detectar las señales de despegue y aterrizaje con precisión y restar ambos tiempos. Se realizó un análisis preliminar de las señales de salto registradas tanto en tiempo como en frecuencia. La Figura 10 muestra el sonido grabado de una ejecución de salto típica con eventos de despegue y aterrizaje, junto con el espectrograma correspondiente.

En el dominio del tiempo, la señal de despegue, correspondiente al despegado de la cinta adhesiva, es una explosión ruidosa que aumenta y disminuye progresivamente con una envoltura similar a la de Gauss. Sin embargo, la señal de aterrizaje es una señal impulsiva que comienza y disminuye repentinamente en el tiempo con un gran valor de amplitud. En el dominio de la frecuencia, la señal de aterrizaje concentra su energía de CC a aproximadamente 4-5 kHz, mientras que la señal de despegue se extiende principalmente de 3 kHz a 20 kHz. Esta composición de frecuencia diferente será explotada más adelante.

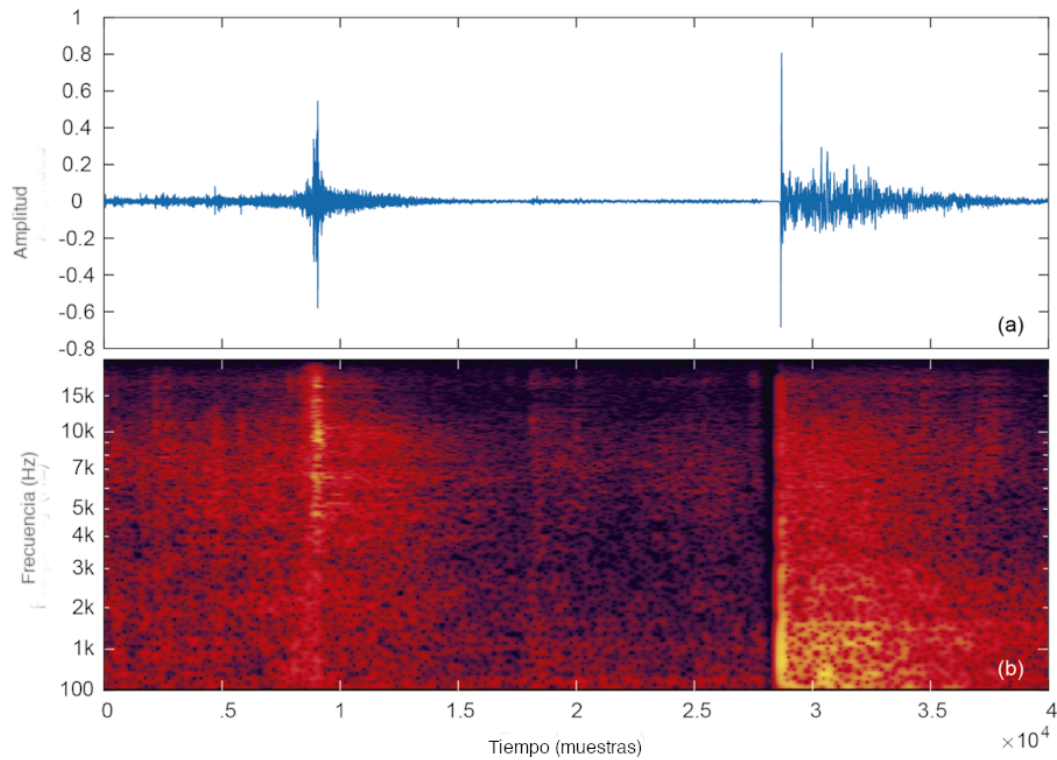


Figura 10. Señal de audio de salto típica que muestra los eventos de despegue y aterrizaje. (a) Forma de onda; (b) Espectrograma.

Dado que el nivel de sonido al aterrizar, correspondiente al impacto de los pies sobre el piso, es considerablemente mayor que en el despegue, parece razonable usar el aterrizaje como un evento de activación para identificar una ejecución de salto. De esta manera, una vez que se ha estimado la posición de tiempo del aterrizaje, el algoritmo procederá a buscar el despegue en una posición anterior. Como se mostrará más adelante, esta tarea es más difícil debido a la naturaleza no impulsiva del sonido. De acuerdo con la composición de frecuencia del sonido al aterrizar, se puede usar una versión de filtro de paso bajo de la señal para distinguir este evento del sonido de despegue y también para suprimir el ruido de fondo en las altas frecuencias. La detección de un evento de aterrizaje, al ser muy energética, puede llevarse a cabo simplemente integrando la energía durante un cierto período de tiempo utilizando una media móvil, y aplicando un umbral a este valor a lo largo del tiempo. Con la versión filtrada de paso bajo de la señal de sonido x_l , la energía promedio se define como:

$$e_l[n] = x_l^2[n] * w[n] \quad (4.1)$$

donde w es una función rectangular para calcular la media móvil por convolución. Con el evento de aterrizaje ya detectado, el comienzo de la señal impulsiva se puede determinar con gran precisión al inspeccionar directamente la señal de tiempo para ubicar un gran punto de paso.

Una vez localizado el punto de aterrizaje, se debe buscar el punto de despegue en una zona de tiempo anterior que incluya posibles patrones de señal de salto realistas. De acuerdo con la composición de frecuencia del sonido de despegue, se puede usar una versión de filtro de paso alto de la señal para distinguir este evento de los sonidos de interferencia en el lugar y también para suprimir el ruido de fondo en las frecuencias bajas. La detección del evento de despegue, que consiste en una ráfaga ruidosa, puede llevarse a cabo integrando la energía durante un cierto período de tiempo utilizando un promedio móvil, y buscando el punto máximo dentro de la zona de búsqueda antes mencionada antes de aterrizar. Sea x_h la versión filtrada de paso alto de la señal de sonido, por lo que la energía promedio se define como:

$$e_h[n] = x_h^2[n] * v[n] \quad (4.2)$$

donde v es una función rectangular para calcular la media móvil por convolución.

La Figura 11 muestra la señal de sonido del salto (a) y el cálculo de energía resultante para frecuencias bajas (b) y altas (c). Para este ejemplo, los filtros de paso alto y bajo son filtros de paso bajo Butterworth de segundo orden con la misma frecuencia de corte de 3 kHz. Las ventanas de promedio móvil se han fijado en 3 ms tanto para w como para v . La Figura 2 (b) muestra que el puede ser un buen indicador de aterrizaje con una diferencia de amplitud suficiente con respecto al nivel de ruido y los niveles de despegue. De manera similar, la Figura 2 (c) muestra un gran pico en la posición de despegue.

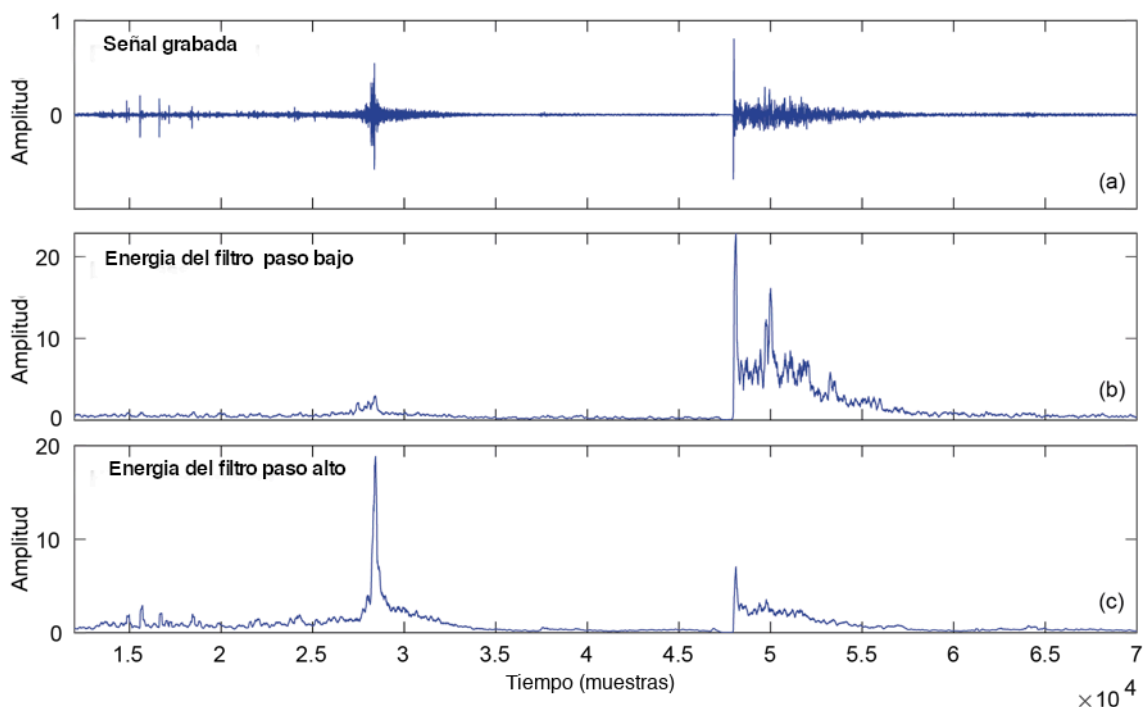


Figura 11. Señal de audio grabada de una ejecución de salto y versiones filtradas para mejorar los eventos de despegue y aterrizaje. (a) Forma de onda; (b) Energía de paso bajo; (c) Energía de paso alto.

Capítulo 5. Optimización de los parámetros del algoritmo

Las características básicas del algoritmo ya han sido establecidas. Sin embargo, una validación adecuada requiere probar el algoritmo con varias señales de ejecución de saltos y optimizar la precisión mediante el ajuste de sus parámetros. Para este propósito, las mediciones de sonido se han llevado a cabo al mismo tiempo que se utiliza un sistema de esterilla de salto comercial como se describe en la Sección 3. Para ajustar el algoritmo, 75 del total de 215 mediciones tomadas (aproximadamente un tercio) se eligieron al azar.

Como se mencionó anteriormente, la detección de la posición de aterrizaje es muy precisa, ya que es una señal impulsiva muy clara. Por el contrario, la detección del punto de despegue no es tan obvia, ya que es una señal más ruidosa que se extiende a lo largo de unos milisegundos. Por lo tanto, los esfuerzos en la optimización de parámetros deben centrarse en la detección de la señal de despegue. Dos parámetros pueden modificarse en esta etapa, la longitud de la media móvil y la frecuencia de corte del filtro de paso alto. Usando las 75 señales de salto elegidas al azar y los resultados emparejados del sistema de esterilla, hemos calculado la diferencia entre la estimación del tiempo de vuelo proporcionada por nuestro algoritmo y la lectura de la esterilla de salto.

La primera prueba de sensibilidad tuvo como objetivo determinar la longitud media móvil óptima. Se han verificado diez longitudes de ventanas de 1 a 10 ms, con una frecuencia de corte constante de 3 kHz. Se calcularon las diferencias y las desviaciones estándar entre la estimación y la lectura de la esterilla de salto para los 75 saltos. La Figura 3 (a) muestra los resultados, donde se puede verificar que el mejor valor para la longitud de la ventana es de 3 ms. No obstante, las ventanas con longitudes más largas no aumentan significativamente el error, pero aumentan la potencia de cálculo, por lo que 3 ms es la mejor opción.

La segunda prueba de sensibilidad está diseñada para seleccionar la frecuencia de corte más apropiada. Considerando una ventana de promedio móvil de 3 ms, las frecuencias de corte de 1 a 10 kHz se han probado en pasos de 1 kHz. La Figura 12 (b) muestra que el mejor valor para la frecuencia de corte es 2 kHz. Sin embargo, tanto 3 como 4 kHz también pueden considerarse como frecuencias de corte óptimas, ya que las diferencias con respecto a 2 kHz son despreciables. De hecho, la señal producida al despegar la cinta tiene poca energía entre 2 y 4 kHz, como se puede ver en la Figura 10 (b). Por lo tanto, a pesar de que en nuestros experimentos, 2 kHz produce un error mínimo, en escenarios muy ruidosos podría ser ventajoso aumentar la frecuencia de corte hasta 3 o 4 kHz para mejorar la inmunidad al ruido del algoritmo.

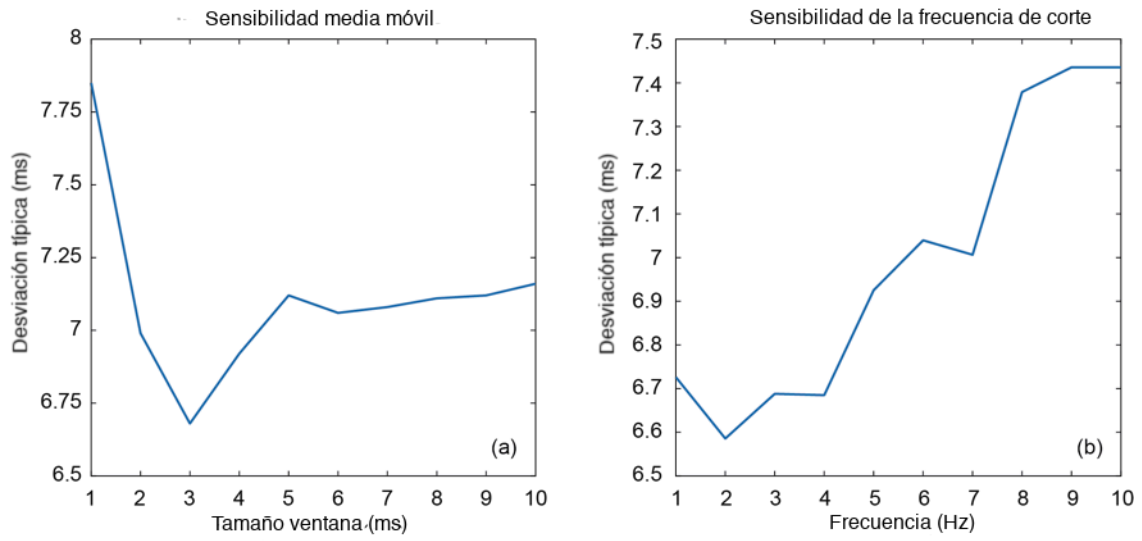


Figura 12. Sensibilidad del algoritmo en función de (a) longitud media móvil y (b) frecuencia de corte.

Capítulo 6. Algoritmo final para la extracción del tiempo de vuelo

A partir de las consideraciones de los puntos anteriores, el algoritmo propuesto para la estimación del tiempo de vuelo realiza el análisis de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. La señal entrante se divide en dos caminos. En una ruta, se aplica un filtro de paso bajo de Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 3 kHz. En la otra ruta, se aplica un filtro de paso alto Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 3 kHz.
2. La energía de la señal se calcula en cada ruta y se promedia en el tiempo con un promedio móvil de 3 ms, equivalente a 144 muestras a $f_s = 48$ kHz.
3. El evento de aterrizaje se detecta en la ruta de baja frecuencia mediante un umbral fijo. Una vez detectado, se utiliza un proceso de ajuste fino para detectar con precisión el comienzo de la señal impulsiva en busca de un gran paso en la señal de dominio de tiempo.
4. Para encontrar el evento de despegue, se define una zona de búsqueda antes del evento de aterrizaje, que incluye posibles saltos realistas desde los valores más pequeños a los más grandes. Esta zona se ha fijado entre 0,2 y 0,8 segundos.
5. La energía promedio máxima en la ruta de alta frecuencia dentro del área de búsqueda se considera el evento de despegue.
6. Finalmente, el tiempo de vuelo se calcula como la diferencia entre los dos eventos.

La figura 13 muestra el diagrama de bloques del algoritmo de procesamiento de señales. El micrófono del teléfono inteligente captura la señal de sonido del salto, que se convierte a digital a una frecuencia de muestreo de 48 kHz, pasando por las diferentes etapas comentadas anteriormente.

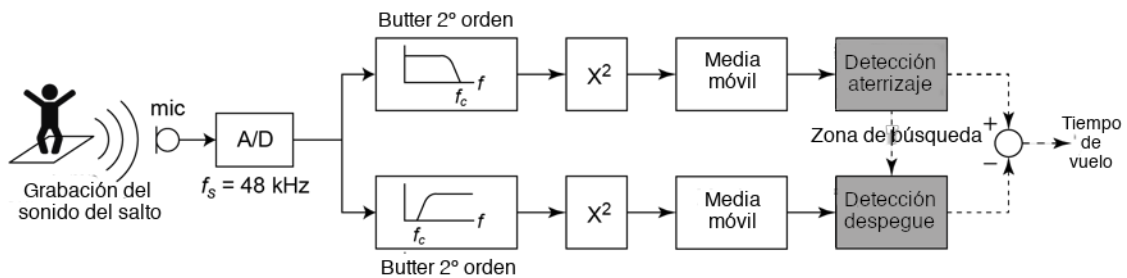


Figura 13. Diagrama de bloques del algoritmo de procesamiento de señales. Las flechas sólidas representan rutas de señal, mientras que las líneas discontinuas representan información.

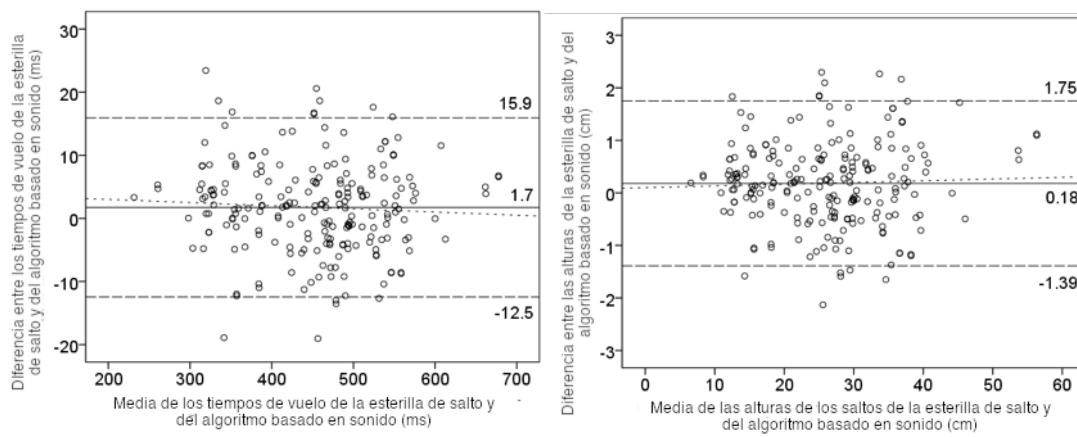
Capítulo 7. Análisis Estadístico de los Resultados

Para examinar el acuerdo entre el sistema propuesto y un instrumento típico utilizado por los profesionales del deporte, se recolectaron un total de 215 saltos de múltiples participantes que realizaron entre 2 y 4 repeticiones de saltos con contramovimiento cada uno, según participante. Los participantes eran alumnado y personal de la Universidad Politécnica de Valencia y a los que se informó acerca de la confidencialidad de la prueba y el tratamiento de los datos adquiridos.

Las estadísticas descriptivas muestran los siguientes tiempos medios de vuelo (media \pm SD): 451.9 ± 85.8 ms para el sistema basado en audio y 453.7 ± 85.3 ms para la esterilla de salto. Siguiendo una ecuación cinemática simple [3], $h = t^2g / 8$, la altura de salto h se puede calcular con el tiempo de vuelo t y la aceleración de la gravedad g (9.81 m / s^2). Las alturas de salto calculadas a partir de los tiempos de vuelo recopilados dieron como resultado valores medios de $25,9 \pm 9,5$ cm para el sistema basado en audio y de $26,1 \pm 9,5$ cm para la esterilla de salto.

El coeficiente de correlación intraclass entre los dos instrumentos muestra una concordancia casi perfecta, tanto la consistencia de la prueba como la concordancia absoluta para el tiempo de vuelo y la altura de salto (ICC = 0.995-0.997).

Los gráficos de Bland-Altman que muestran límites de acuerdo del 95% para el tiempo de vuelo y la altura del salto (Figura 14) mostraron un alto nivel de acuerdo, ya que casi todas las mediciones pareadas se encuentran dentro de $\pm 1.96 * SD$ de las diferencias (línea discontinua). La Figura 5 también muestra un bajo sesgo sistemático \pm errores aleatorios como 1.74 ± 14.19 ms y 0.18 ± 1.57 cm para el tiempo de vuelo y la altura de salto, respectivamente [15,29].



(a)

(b)

Figura 14. Diagramas de Bland-Altman para las mediciones del sistema de esterilla de salto y el sistema basado en audio. La línea central sólida representa la media entre instrumentos (sesgo sistemático); las líneas discontinuas superiores e inferiores muestran la media $\pm 1.96 SD$ (error aleatorio); La línea punteada muestra regresión (sesgo proporcional). (a) Tiempo de vuelo:

regresión $y = -0.005x + 4$ ms, $r^2 = 0.003$; (b) Altura de salto: regresión $y = 0.003x + 0.1$ cm, $r^2 = 0.002$.

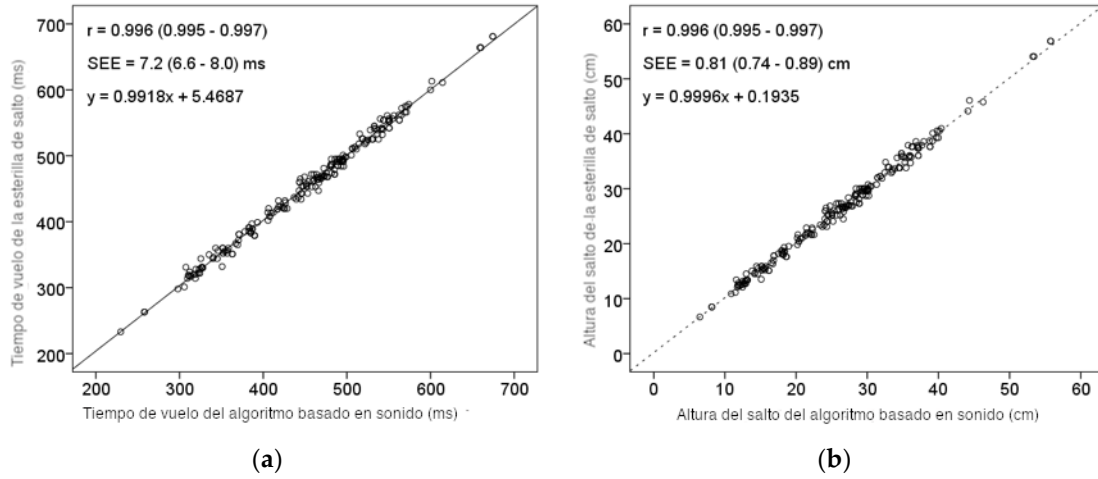


Figura 15. Relación entre las mediciones derivadas del sistema de esterilla de salto y el sistema basado en audio. (a) Tiempo de vuelo; (b) Altura de salto. El coeficiente de correlación del momento del producto de Pearson (r) y el error estándar de estimación (SEE) se muestran con un intervalo de confianza del 95% entre paréntesis; $p < 0.01$.

Capítulo 8. Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar un instrumento no invasivo para medir la altura del salto mediante la extracción automática de los eventos de despegue y aterrizaje de las grabaciones de audio. La altura de salto se ha medido tradicionalmente con instrumentos de laboratorio, como las placas de fuerza [4] o la captura de movimiento 3D [6], o con instrumentos más simples a través del tiempo de vuelo de salto, como las esterillas de salto [16] o las placas de fotocélulas [11]. Mientras que estos últimos han sido muy populares debido a su portabilidad y bajo costo, recientemente, las aplicaciones de teléfonos inteligentes que apuntan a medir la altura de salto se han generalizado debido a su portabilidad, conectividad y procesamiento de datos. Sin embargo, el principal inconveniente de estos sistemas es la precisión de las mediciones realizadas a través de la digitalización manual de las grabaciones de video con resolución temporal limitada (fps) y un procesamiento posterior que requiere mucho tiempo.

El sistema desarrollado captura el patrón de onda de sonido de las ejecuciones de saltos para detectar el despegue y el aterrizaje automáticamente, a partir de los cuales se calcula la altura de los saltos en tiempo real sin digitalización manual en resoluciones temporales que superan a las esteras basadas en el tiempo de vuelo (generalmente 1,000 Hz) y velocidades de video de alta velocidad desde teléfonos inteligentes (típicamente 240 fps).

Se ha desarrollado un algoritmo de procesamiento de señal a medida para la clasificación y detección de eventos de audio para esta aplicación. Basado en diferentes composiciones espectrales de las fases de despegue y aterrizaje en una ejecución de salto, el algoritmo es capaz de detectar y clasificar los eventos de tiempo con precisión. La energía promediada en el tiempo en su banda de frecuencia correspondiente se ha utilizado con éxito como umbral simple debido a la alta energía producida en el aterrizaje. El despegue se detecta dentro de una ventana de tiempo de búsqueda antes del aterrizaje. Los diferentes parámetros del algoritmo se han optimizado para un error mínimo mediante una prueba de sensibilidad utilizando un conjunto de entrenamiento de saltos. El algoritmo ha demostrado ser robusto a diferentes fondos de ruido y características de reverberación de las instalaciones deportivas típicas donde se realizan pruebas de altura de salto.

También se llevó a cabo un estudio de validación comparando las alturas de salto medidas del sistema basado en audio con las de un sistema de plataforma de salto comercial validado [16]. Hubo un acuerdo casi perfecto entre estos instrumentos ($ICC \sim 1$), lo que indica que la fiabilidad del sistema basado en audio es prácticamente perfecta [15]. Esta declaración también es compatible con los estrechos intervalos de confianza para el tiempo de vuelo y la altura de salto, la coherencia y el acuerdo absoluto (0.995 - 0.997). Además, el acuerdo entre dos mediciones de la misma variable se evalúa mediante el método estadístico actualmente reconocido de los gráficos de Bland-Altman [24]. En este estudio, los gráficos de Bland-Altman demostraron un sesgo sistemático de altura de salto insignificante entre los instrumentos (0,18 cm) y, por lo tanto, el sistema de audio puede considerarse como una herramienta de medición con alta precisión. De manera similar, los estrechos límites de acuerdo (1,6 cm) sugieren una alta precisión de la herramienta de medición. Además, el gráfico muestra que casi todos los puntos están dispersos a ambos lados del sesgo sistemático dentro de los límites del acuerdo. La línea de regresión y el coeficiente de correlación del momento del producto de Pearson de datos dispersos no revelaron asociación entre la magnitud de los errores y el valor medio ($r^2 < 0.1$)



[25]. Tal comportamiento del error significa que, independientemente de la puntuación de altura de salto medida por el sistema basado en audio, la cantidad de error de medición será estable. Esta característica es de suma importancia para evaluar pequeños cambios típicos en atletas con puntajes altos en respuesta a una intervención experimental [29],[30].

Como conclusión final podemos decir que los objetivos del proyecto han sido sobradamente conseguidos, incluso superando las expectativas que se tenían al principio, dado que la precisión conseguida como mínimo iguala a la de plataformas profesionales de salto con un coste elevado y un cierto tiempo de instalación y puesta en funcionamiento.

El hecho de que con un simple teléfono móvil, del cual dispone cualquier atleta o entrenador, se pueda medir la altura del salto con precisión, puede suponer una auténtica revolución en este campo.

8.1 Desarrollos Futuros

El desarrollo futuro evidente que se desprende de este trabajo, es la implementación del algoritmo en tiempo real en un smartphone mediante el desarrollo de una APP.

Gracias a que en este trabajo se ha tenido en cuenta desde el principio, que el algoritmo a desarrollar tenga un coste computacional bajo, la implementación no resultará problemática.

La implementación de la APP ya no forma parte de este trabajo, pero a fecha de finalización de la redacción del mismo, el grupo de investigación ya tiene una primera versión de dicha APP para las primeras pruebas de validación.

La idea final es que esta APP sea puesta a disposición de los atletas de todo el mundo en las tiendas de APP de los principales sistemas operativos móviles (Android e iOS).

Capítulo 9. Bibliografía

1. Buchheit, M.; Spencer, M.; Ahmaidi, S. Reliability, usefulness, and validity of a repeated sprint and jump ability test. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2010**, *5*, 3–17.
2. Markovic, G.; Dizdar, D.; Jukic, I.; Cardinale, M. Reliability and Factorial Validity of Squat and Countermovement Jump Tests. *J. Strength Cond. Res.* **2004**, *18*, 551–555, doi:10.1519/00124278-200408000-00028.
3. Bosco, C.; Luhtanen, P.; Komi, P. V A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1983**, *50*, 273–282, doi:10.1007/BF00422166.
4. Baca, A. A comparison of methods for analyzing drop jump performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1999**, *31*, 437–442, doi:10.1097/00005768-199903000-00013.
5. Barris, S.; Button, C. A review of vision-based motion analysis in sport. *Sport. Med.* **2008**, *38*, 1025–1043, doi:10.2165/00007256-200838120-00006.
6. Aragón, L. F. Evaluation of Four Vertical Jump Tests: Methodology, Reliability, Validity, and Accuracy. *Meas. Phys. Educ. Exerc. Sci.* **2000**, *4*, 215–228, doi:10.1207/S15327841MPEE0404_2.
7. Hatze, H. Validity and reliability of methods for testing vertical jumping performance. *J. Appl. Biomech.* **1998**, *14*, 127–140.
8. Buckthorpe, M.; Morris, J.; Folland, J. P. Validity of vertical jump measurement devices. *J Sport. Sci* **2012**, *30*, 63–69, doi:10.1080/02640414.2011.624539.
9. Pueo, B.; Lipinska, P.; Jiménez-Olmedo, J. M.; Zmijewski, P.; Hopkins, W. G. Accuracy of jump-mat systems for measuring jump height. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2017**, *12*, doi:10.1123/ijsp.2016-0511.
10. García-López, J.; Morante, J. C.; Ogueta-Alday, A.; Rodríguez-Marroyo, J. A. The type of mat (contact vs. photocell) affects vertical jump height estimated from flight time. *J. Strength Cond. Res.* **2013**, *27*, 1162–1167, doi:10.1519/JSC.0b013e31826520d7.
11. Castagna, C.; Ganzetti, M.; Ditroilo, M.; Giovannelli, M.; Rocchetti, A.; Mazi, V. Concurrent Validity of Vertical Jump Performance Assessment Systems. *J. Strength Cond. Res.* **2013**, *27*, 761–768.
12. Balsalobre-Fernandez, C.; Glaister, M.; Lockey, R. A. The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *J. Sports Sci.* **2015**, 1–6, doi:10.1080/02640414.2014.996184.
13. Linthorne, N. P. Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Am. J. Phys.* **2001**, *69*, 1198–1204, doi:10.1119/1.1397460.
14. Pueo, B. High speed cameras for motion analysis in sports science. *J. Hum. Sport Exerc.* **2016**, *11*, 53–73, doi:10.14198/jhse.2016.111.05.
15. Bartlett, J. W.; Frost, C. Reliability, repeatability and reproducibility: Analysis of measurement errors in continuous variables. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* **2008**, *31*, 466–475, doi:10.1002/uog.5256.
16. Pueo, B.; Lipinska, P.; Jiménez-Olmedo, J. M.; Zmijewski, P.; Hopkins, W. G. Accuracy of jump-mat systems for measuring jump height. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2017**, *12*, 959–963, doi:10.1123/ijsp.2016-0511.
17. Stowell, D.; Giannoulis, D.; Benetos, E.; Lagrange, M.; Plumbley, M. D. Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events. *IEEE Trans. Multimed.* **2015**, *17*, 1733–1746, doi:10.1109/TMM.2015.2428998.
18. DCASE2019 Challenge - DCASE Available online: <http://dcase.community/challenge2019/index> (accessed on Apr 5, 2019).
19. Phan, H.; Koch, P.; Katzberg, F.; Maass, M.; Mazur, R.; McLoughlin, I.; Mertins, A. What makes audio event detection harder than classification? In *25th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2017*; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017; Vol. 2017–January, pp.



2739–2743.

20. Hopkins, W. G.; Marshall, S. W.; Batterham, A. M.; Hanin, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2009**, *41*, 3–12, doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278.
21. Koo, T. K.; Li, M. Y. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J. Chiropr. Med.* **2016**, *15*, 155–63, doi:10.1016/j.jcm.2016.02.012.
22. Buchheit, M. The Numbers Will Love You Back in Return – I Promise. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2016**, 551–554.
23. Haugen, T.; Buchheit, M. Sprint Running Performance Monitoring: Methodological and Practical Considerations. *Sport. Med.* **2016**, *46*, 641–656, doi:10.1007/s40279-015-0446-0.
24. Bland, J. M.; Altman, D. G. Statistical Methods for Assessing Agreement Between Two Methods of Clinical Measurement. *Lancet* **1986**, *327*, 307–310, doi:10.1016/S0140-6736(86)90837-8.
25. Atkinson, G.; Nevill, A. Statistical Methods for Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine. *Sport. Med.* **1998**, *26*, 217–238, doi:10.2165/00007256-199826040-00002.
26. Hopkins, W. G. sportsci.org. *Sportscience* **2018**, *8*, 1–7.
27. Pyne, D. Measurement studies in sports science research. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2008**, *3*, 409–410, doi:10.1123/ijsp.3.4.409.
28. Hopkins, W. G. Spreadsheet for analysis of validity and reliability. *Sportscience* **2015**, *19*, 36–42.
29. O'Donoghue, P. *Research Methods for Sports Performance Analysis*; 2009; ISBN 978-0415496223.
30. Batterham, A. M.; Hopkins, W. G. Making Meaningful Inferences About Magnitudes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2006**, *1*, 50–57, doi:10.1123/ijsp.1.1.50.