

El flujo óptico como herramienta para el vídeo-análisis de fenómenos físicos

Jose Luis Hueso, Jaime Riera, Damián Ginestar
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
dginesta@mat.upv.es, jlhueso@mat.upv.es, jriera@fis.upv.es

Abstract

En este artículo se presenta el análisis del flujo óptico como una herramienta que permite caracterizar el movimiento de un cuerpo de forma automática a partir del análisis de un vídeo digital. Esto permite sustituir un montaje experimental complejo por un sistema de grabación de vídeos que, tras el gran desarrollo experimentado por los sistemas multimedia en los últimos años, resulta mucho más asequible. Se muestran los resultados obtenidos en el análisis de distintos experimentos y se comenta su posible utilización en un laboratorio docente.

The optical flow analysis is presented as a useful tool to characterize the movement of a body in an automatic way using a digital video. This technique allows to substitute a complex experimental set-up by a video recording system, which is easily available since the large development in the last years of the multi-media systems. Some results obtained from the analysis of different experiments are shown and the possible use of this kind of technique in a teaching laboratory is discussed.

Keywords: Análisis de vídeos, flujo óptico, laboratorios docentes.
Video analysis, optical flow, teaching labs

1 Introducción

Una de las fases en la utilización de modelos matemáticos para la descripción de un proceso es su validación experimental, mediante la realización de experimentos en los que se estudia alguna de las variables presentes en el modelo. Con el rápido desarrollo de los ordenadores y las cámaras digitales el análisis de vídeos digitales se ha convertido en una herramienta accesible y de fácil utilización. De este modo, muchos procesos se pueden analizar mediante el análisis de un vídeo de los mismos evitando tener que utilizar un montaje de medida experimental complejo. Un vídeo es una sucesión de fotogramas que se corresponden con un instante de tiempo. Así, se pueden estudiar trayectorias de un determinado sistema (como se muestra en la Figura 1) asociando su posición con un fotograma dado y, por ello, con un instante determinado.



Figura 1: Superposición de fotogramas de un vídeo.

Una de las técnicas más provechosas en las que se basa el análisis de vídeos digitales es la estimación del flujo óptico correspondiente a dos imágenes consecutivas. El objetivo de este análisis es la determinación del campo de velocidades bidimensionales correspondiente a la proyección de las velocidades tridimensionales de los distintos objetos presentes en la imagen en el plano de la imagen. Como ejemplo, en la Figura 2, se presenta el flujo óptico obtenido en el análisis de distintas escenas.

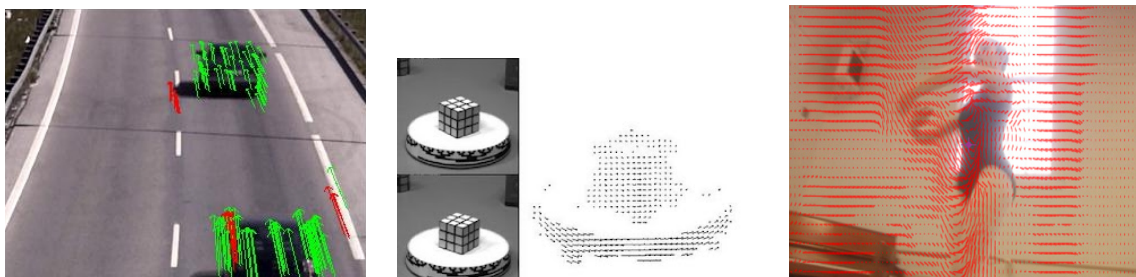


Figura 2: Flujo óptico en distintas escenas.

Para el cálculo del flujo óptico, se asume que la imagen no sufre grandes cambios de iluminación. Basándose en este supuesto se han propuesto distintas técnicas [1]. Una de ellas es el análisis de la correlación de los distintos fotogramas del vídeo con una región de interés que se quiere seguir. Otros métodos para la determinación del flujo óptico son las técnicas diferenciales, en las que la determinación del flujo se basa en el cálculo de derivadas espaciales y temporales de las imágenes [2]. Algunas de estas técnicas se basan en la optimización de expresiones del tipo energía local y como representante de este tipo de métodos se tiene el método de Lucas y Kanade [3], [4]. La utilización de una técnica en particular depende de la aplicación que se quiera hacer de los datos de flujo óptico obtenidos y la necesidad de rapidez en su cálculo.

El resto del artículo se estructura del modo siguiente: en la sección 2 se revisan algunas ideas utilizadas para la determinación del flujo óptico. En la sección 3 se mostrarán distintas aplicaciones del flujo óptico para el análisis de sistemas físicos cuyo comportamiento es simple, como el carril cinemático, y el resorte, así como sistemas con comportamientos más complejos como la ‘pelota saltadora’. Finalmente, en la sección 5 se resumen las conclusiones más importantes obtenidas.

2 Estimación del flujo óptico

Un primer enfoque para la determinación del flujo óptico se basa en tratar de reconocer un cierto patrón en cada fotograma. Si el patrón a identificar es $h(i, j)$ y la imagen $I(i, j)$, se determina el máximo de la correlación de las dos imágenes

$$\text{cor}(i, j) = \sum_l \sum_m I(l, m)h(i + l, j + m) .$$

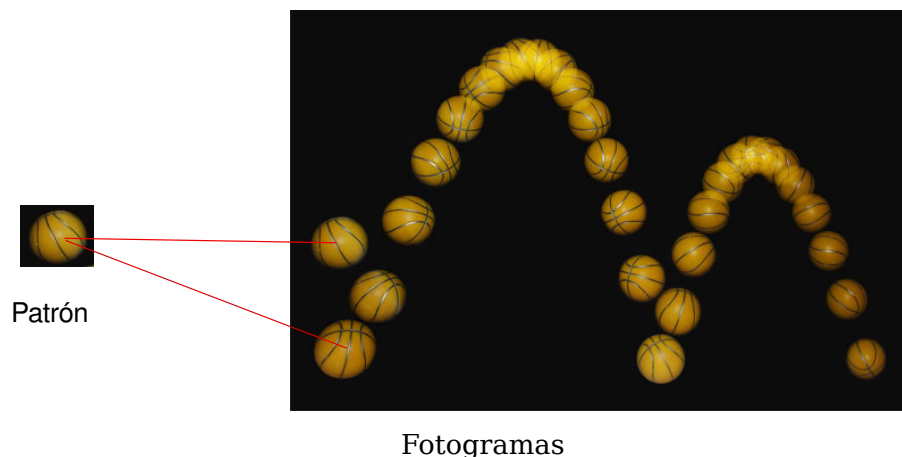


Figura 3: Correlación de un patrón en un fotograma.

El cálculo de la correlación de las dos imágenes es costoso y se puede agilizar utilizando la transformada rápida de Fourier y sus propiedades [5].

Otro enfoque que se sigue para estimar el flujo óptico se basa en suponer que no hay muchos cambios en la intensidad de la imagen de un fotograma al siguiente y utilizar la restricción del flujo óptico. Para obtener esta restricción, llamamos $I(x, y, t)$ a la intensidad de la imagen en

el píxel (x, y) en el tiempo t y suponemos que existe una traslación (v_x, v_y) , tal que

$$I(x + v_x, y + v_y, t + 1) = I(x, y, t) .$$

Usando el primer orden del desarrollo de Taylor, se impone que

$$\frac{\partial I}{\partial t}(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x}(x, y, t) v_x + \frac{\partial I}{\partial y}(x, y, t) v_y = 0 , \quad (1)$$

que es la *restricción del flujo óptico*.

Entre los algoritmos basados en la *restricción del flujo óptico* se puede distinguir entre algoritmos dispersos y densos. Los algoritmos dispersos calculan el flujo óptico de una serie de puntos de interés de la imagen, como se muestra en la Figura 4. Uno de los algoritmos más utilizados para el cálculo del flujo disperso es el algoritmo de Lucas y Kanade [3] o alguna de sus variantes [4].



Figura 4: Flujo óptico disperso.

Los algoritmos densos determinan el flujo óptico para todos los píxeles de la imagen, como se muestra en la Figura 5. Estos algoritmos se basan en la solución de la *restricción del flujo óptico* junto con alguna condición extra que determina el problema. Uno de los algoritmos para la determinación del flujo óptico denso más populares es el algoritmo de Horn y Schunck [6, 2].



Figura 5: Flujo óptico denso.

3 Experimentos de física

A continuación, mostraremos distintos experimentos sencillos que se pueden analizar utilizando un vídeo del mismo. La secuencia de fotogramas obtenidos se analizará usando técnicas de flujo óptico.

3.1 Movimiento rectilíneo: Carril

En primer lugar, se analiza un carril por el que se mueve un cuerpo con velocidad uniforme. Distintos fotogramas del vídeo de su trayectoria se muestran en la Figura 6.

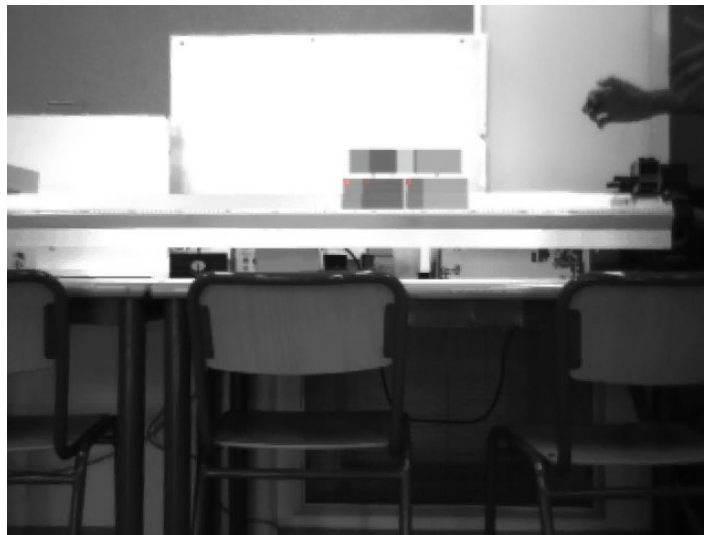


Figura 6: Fotogramas del carril.

A partir de los datos de la posición del cuerpo obtenidos a través del flujo óptico, se ajusta una recta de mínimos cuadrados que nos permite conocer la velocidad del cuerpo. Los datos correspondientes al desplazamiento del cuerpo como función del número de fotograma y, por tanto, del tiempo se muestran en la Figura 7. La secuencia de vídeo ha sido grabada usando un sistema de vídeo PAL, que presenta una velocidad de 25 imágenes por segundo.

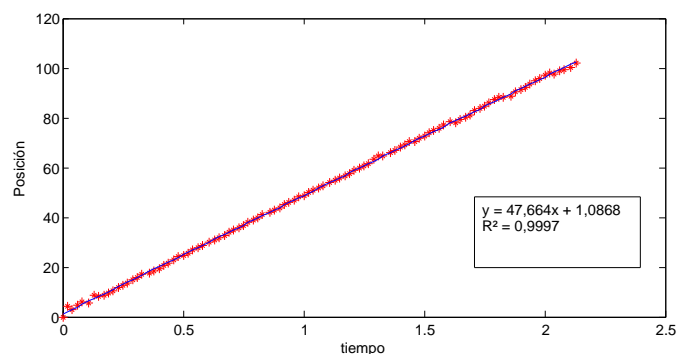


Figura 7: Ajuste de los datos de flujo óptico correspondientes al movimiento de un cuerpo sobre un carril.

3.2 Resorte

Otro sistema que se puede estudiar es el movimiento de un cuerpo suspendido por un muelle. Distintos fotogramas del vídeo de este experimento se muestran en la Figura 8.

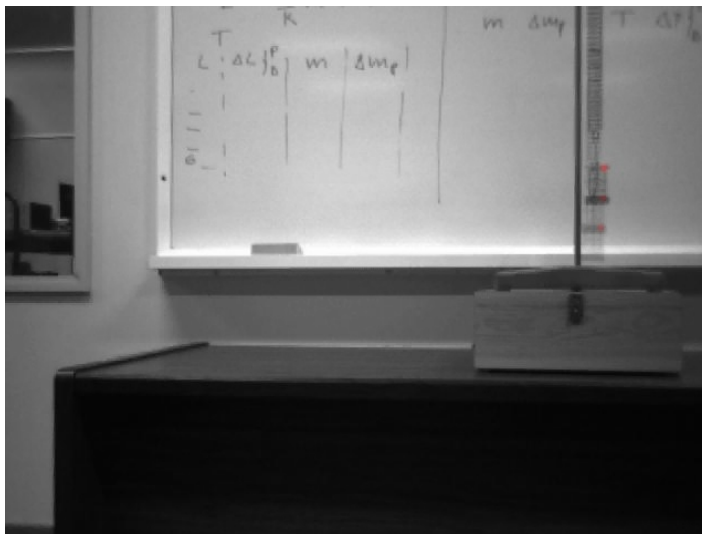


Figura 8: Movimiento de un cuerpo suspendido de un muelle.

La representación de la posición en función del tiempo describe un movimiento armónico simple, dado que el amortiguamiento es despreciable. A partir de estos datos se puede calcular el período del movimiento, su amplitud y, conocida la masa del sistema, la constante elástica del muelle. Si se realizara una grabación de larga duración, podríamos analizar la variación de la amplitud del movimiento con el tiempo y, con ello, extraer información sobre el factor de amortiguamiento.

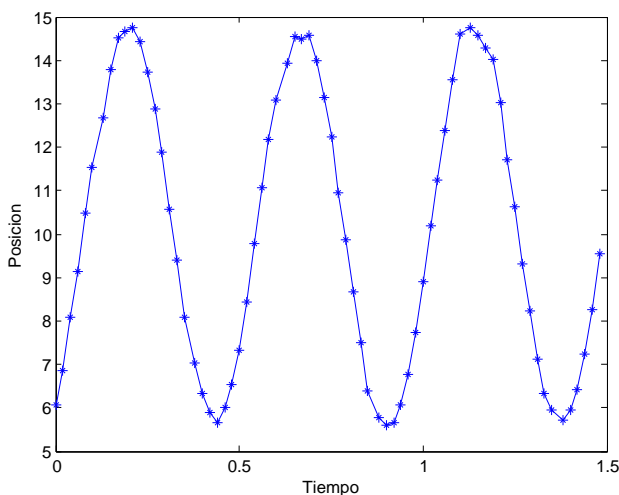


Figura 9: Trayectoria del cuerpo suspendido por un muelle.

3.3 Seguimiento tridimensional

Para el seguimiento de un objeto en el espacio tridimensional se usan las proyecciones en dos cámaras sincronizadas. Así, si se tienen las proyecciones (u_l, v_l) y (u_r, v_r) en las dos cámaras, mediante una triangulación se obtienen las coordenadas (x, y, z) del punto en el espacio (véase la Figura 10).

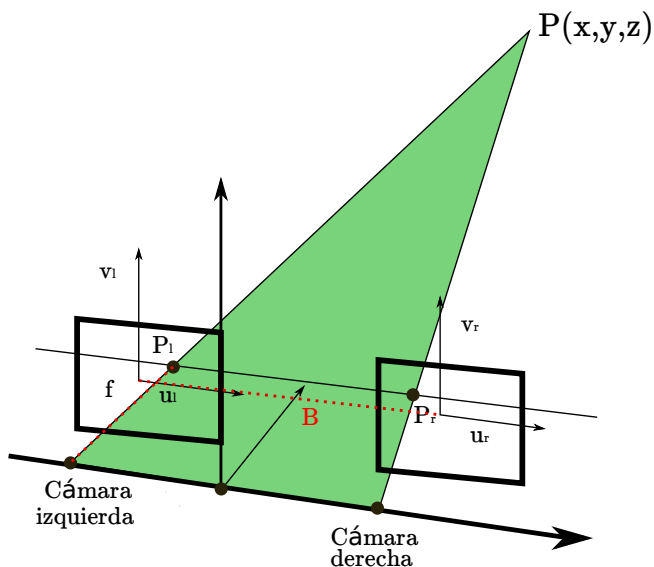


Figura 10: Triangulación para dos cámaras.

Se tienen las relaciones

$$x = \frac{u_l B}{u_l - u_r} - \frac{B}{2},$$

$$y = \frac{B f}{u_l - u_r},$$

$$z = \frac{B v_l}{u_l - u_r}.$$

De este modo, utilizando información del flujo óptico de las dos cámaras se puede seguir la trayectoria de un cuerpo en el espacio. Un ejemplo de aplicación lo constituye el experimento de Coriolis que se muestra en la Figura 11, [7].

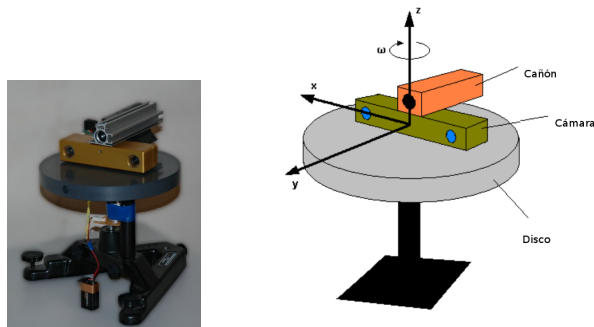


Figura 11: Experimento de Coriolis.

En este experimento se tiene un cañón sobre una plataforma giratoria que gira con una velocidad constante. El cañón lanza una bolita cuya trayectoria se sigue con una cámara estereoscópica unida rígidamente a la plataforma giratoria. Distintos fotogramas de las cámaras izquierda y derecha se muestran en la Figura 12.

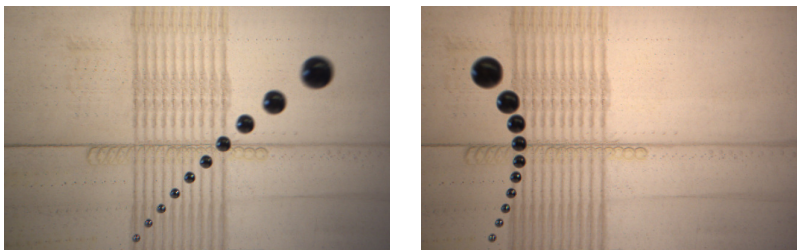


Figura 12: Distintos fotogramas obtenidos mediante las cámaras izquierda y derecha de la bola.

A partir de los datos del flujo óptico para las dos cámaras se obtiene la trayectoria que se muestra en la Figura 13.

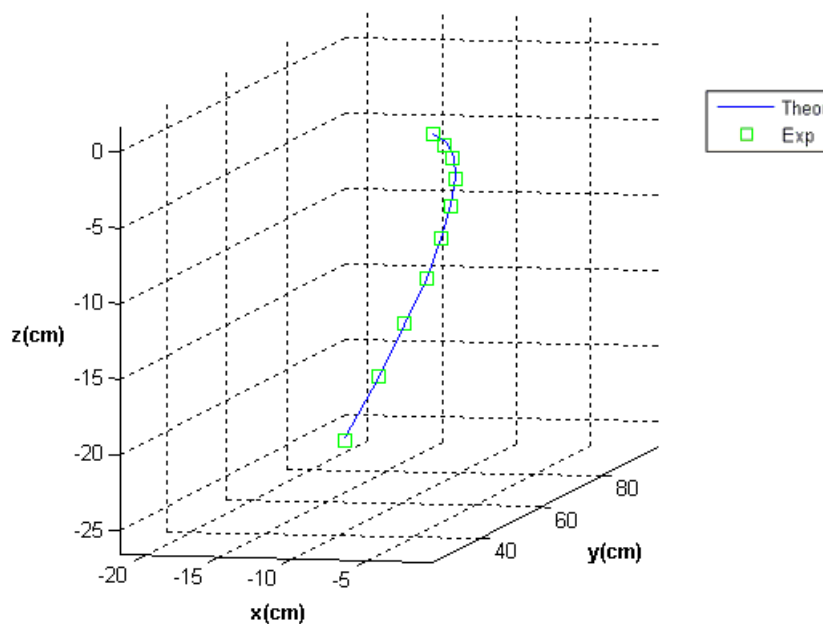


Figura 13: Trayectoria de la bola en el experimento de Coriolis.

Las ecuaciones que rigen la trayectoria de la bola viene dadas por,

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= v_x, & \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -2v_y\omega + \omega^2x, \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= v_y, & \frac{\partial v_y}{\partial t} &= 2v_x\omega + \omega^2y, \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= v_z, & \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -g, \end{aligned} \quad (2)$$

donde (x, y, z) son las coordenadas de la bola, (v_x, v_y, v_z) las correspondientes velocidades, ω la

velocidad angular de la plataforma giratoria y g la aceleración de la gravedad.

Integrando el sistema de ecuaciones se obtiene la trayectoria de la bola. La velocidad inicial de la bola a la salida del cañón y la velocidad angular de la plataforma giratoria son desconocidas a priori y se obtienen minimizando el error entre la trayectoria obtenida mediante el flujo óptico y la trayectoria obtenida integrando las ecuaciones (2). Los resultados obtenidos para el ajuste de estas magnitudes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo del experimento de Coriolis.

Parámetros	Experimental	Ajustado
ω	$1.05 \pm 0.02 \text{ rad s}^{-1}$	$1.07 \pm 0.05 \text{ rad s}^{-1}$
v_0	$404 \pm 2 \text{ cm s}^{-1}$	$408 \pm 3 \text{ cm s}^{-1}$

3.4 Pelota 'saltadora'

La pelota 'saltadora' es un sistema muy sencillo, que presenta distintos regímenes en su dinámica, dependiendo del valor de algunos parámetros del modelo. Una foto del experimento se muestra en la Figura 14. En este montaje se hace saltar una pelota sobre la membrana de un altavoz que está conectado a un generador de ondas, que permite alimentar el altavoz con una onda sinusoidal con distintas amplitudes (voltaje) y distintas frecuencias.

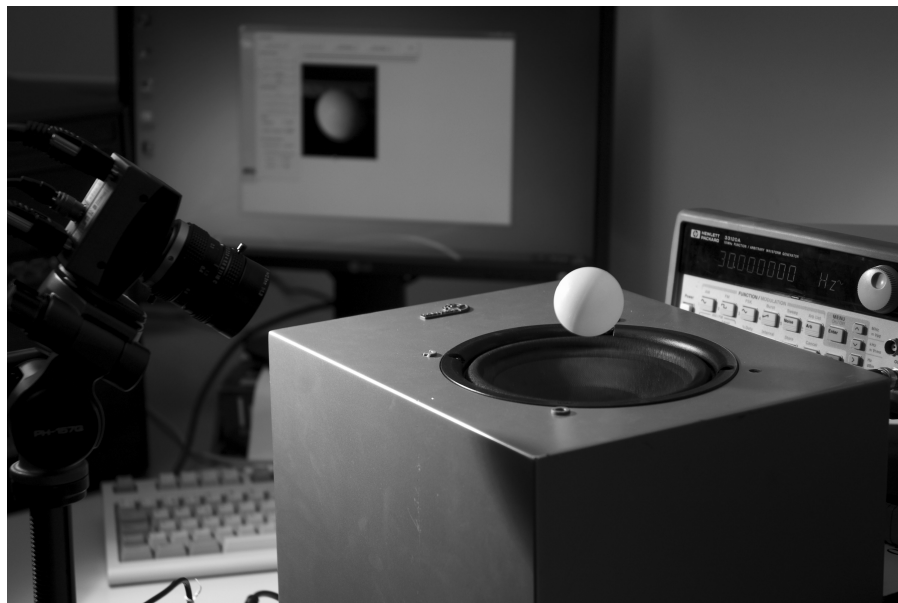


Figura 14: Foto del experimento de la 'pelota saltadora'.

Se puede plantear un modelo para simular el comportamiento de este sistema [8]. En la Figura 15, se muestra la trayectoria de la pelota obtenida a partir del flujo óptico y mediante el modelo de este sistema. En la Figura 16 se muestra el espectro asociada a la trayectoria de la pelota en este caso. Se observa una frecuencia dominante de 30 Hz que es la frecuencia de la onda que alimenta el altavoz.

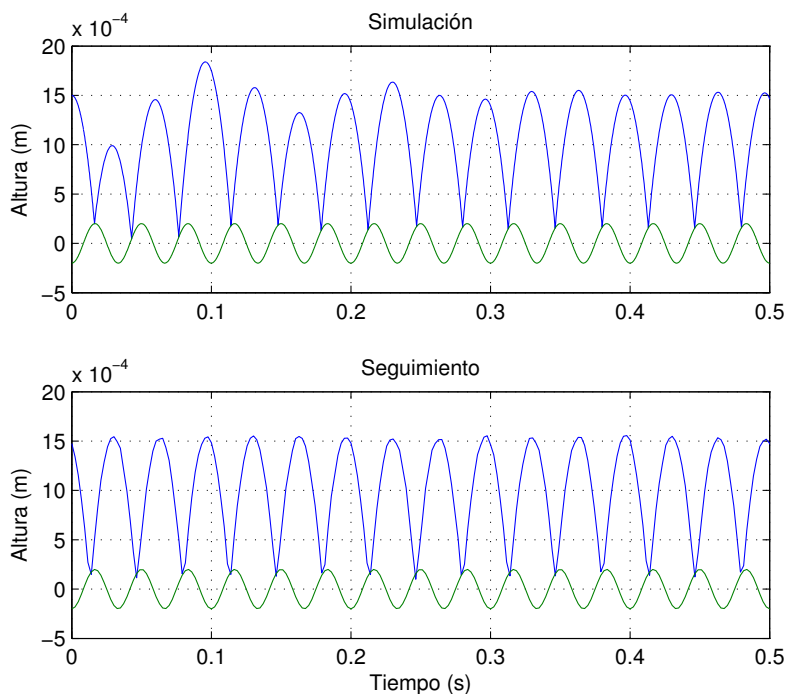


Figura 15: Trayectoria simulada y medida de la ‘pelota saltadora’ para una onda con una amplitud correspondiente a 1.5 V y una frecuencia de 30 Hz.

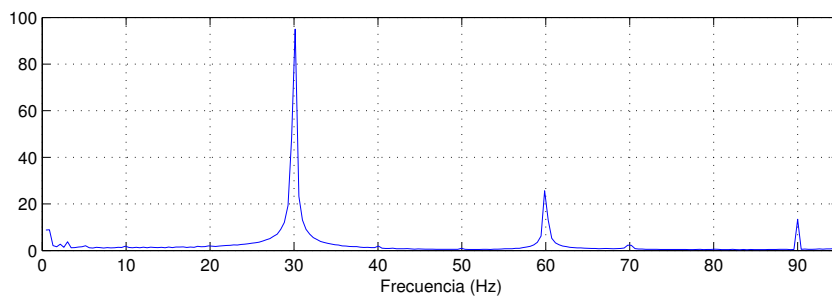


Figura 16: Espectro de la trayectoria de la ‘pelota saltadora’ para una onda con una amplitud correspondiente a 1.5 V y una frecuencia de 30 Hz.

Si se alimenta el altavoz con una onda cuya amplitud corresponde a 1.9 V, se obtiene la trayectoria que se muestra en la Figura 17, y el espectro correspondiente se muestra en la Figura 18. En este caso, se tiene la frecuencia de 30 Hz y una frecuencia de aproximadamente 15 Hz, con lo que se observa una duplicación del período en el movimiento de la pelota.

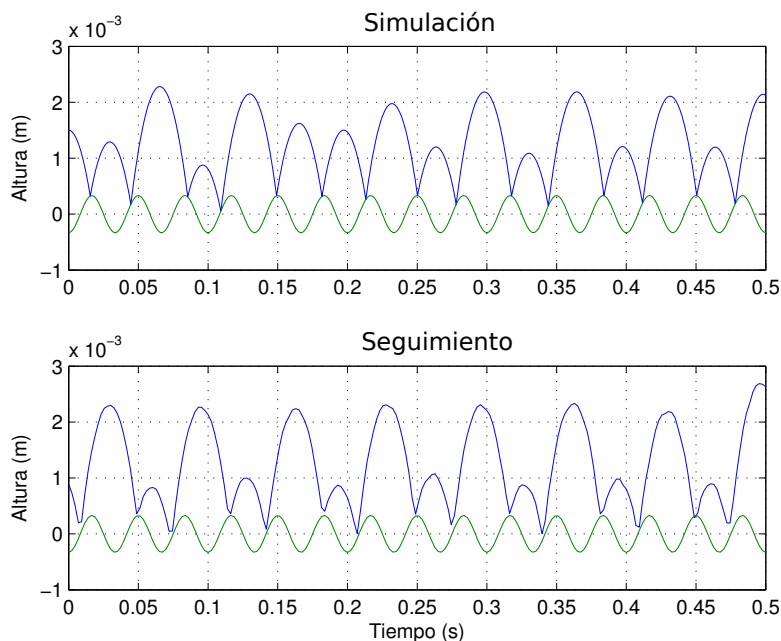


Figura 17: Trayectoria simulada y medida de la ‘pelota saltadora’ para una onda con una amplitud correspondiente a 1.9 V y una frecuencia de 30 Hz.

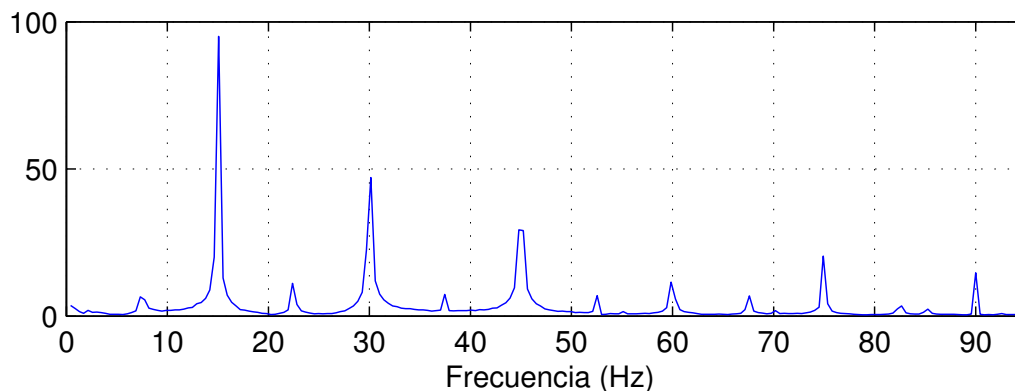


Figura 18: Espectro de la trayectoria de la ‘pelota saltadora’ para una onda con una amplitud correspondiente a 1.9 V y una frecuencia de 30 Hz.

Si se sigue aumentando la amplitud de la onda, el movimiento de la pelota se vuelve mucho más complejo. En la Figura 19 se muestra la trayectoria que sigue la pelota cuando se alimenta el altavoz con una onda cuya amplitud corresponde a un voltaje de 2.26 V y el espectro correspondiente. Se observa que el movimiento es más complejo presentando un gran número de frecuencias. El sistema presenta un comportamiento caótico y la ruta al caos es mediante la duplicación de períodos.

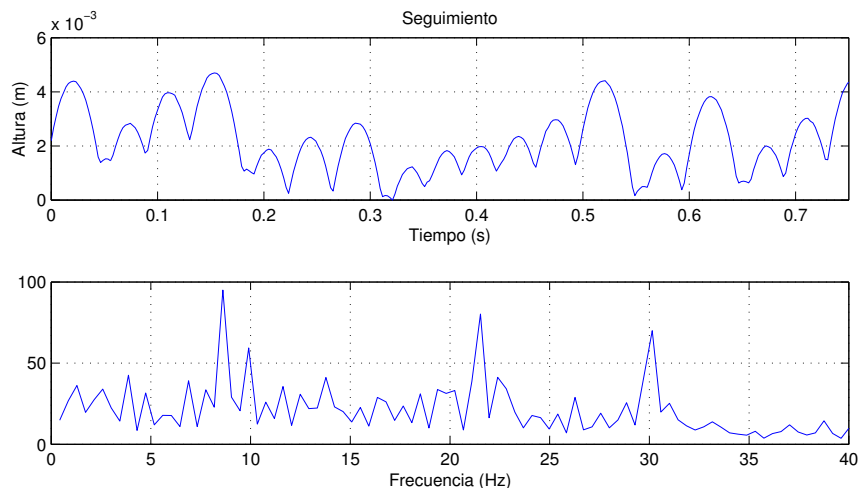


Figura 19: Trayectoria y espectro del movimiento de la pelota para un voltaje de 2.26 V y frecuencia 30 Hz.

4 Utilización del análisis de vídeos en el aula

El análisis de vídeo está siendo utilizado cada vez más para afianzar los conceptos relacionados con la cinemática y dinámica de los cuerpos [9, 10, 11].

A continuación describimos un ejemplo del uso de esta técnica en el laboratorio docente de la ETSID de Valencia. Partimos de un grupo de 28 alumnos agrupados en equipos de 3 participantes, desarrollándose la actividad en una sesión de 2 horas. El experimento consiste en analizar el movimiento de una deslizadora sobre un carril neumático. En el experimento convencional, el tiempo que tarda la deslizadora en pasar por distintos puntos del carril se determina mediante un arco con láser. El paso de la deslizadora activa o desactiva un cronómetro, pudiéndose de esa forma determinar el tiempo transcurrido hasta llegar a una determinada posición. Sin embargo, el alto coste de estos sensores hace inviable disponer de varios de ellos en un montaje docente. Por ello, la determinación de distintos puntos exige la repetición del experimento en los que el sensor se sitúa en distintas posiciones, con la consiguiente dispersión de resultados. Como alternativa, planteamos la utilización del flujo óptico en la metodología de la citada práctica. El seguimiento digital permite la obtención de un gran número de puntos experimentales en un único experimento.

A cada equipo de alumnos se les pide el análisis de dos secuencias de vídeo: una de ellas se les proporcionaba ya preparada para ser analizada, mientras que la segunda la tenían que obtener a través de un único puesto de grabación que existía en el laboratorio, y por el que iban pasando todos los equipos sucesivamente. Los alumnos grababan el desplazamiento de la deslizadora, con una cámara web Logitech, c210 Webcam. La cámara había sido calibrada previamente usando un 'toolbox' de calibración de cámara para Matlab [12]. De esta forma, siempre que el plano del movimiento se sitúe perpendicularmente al eje de la cámara, se pueden transformar posteriormente las medidas espaciales en coordenadas métricas. La herramienta de seguimiento digital ha sido diseñada en nuestro laboratorio, utilizando una interfaz gráfica desarrollada en VisualBasic, que incorpora un módulo de seguimiento de flujo óptico basado en los algoritmos de Lucas y Kanade [3]. Mediante la misma, los alumnos seleccionan el tramo de vídeo a analizar, el elemento de la deslizadora sobre el que se va a realizar el seguimiento (filtro), obteniendo la

posición del mismo en píxeles, en función del número de fotograma. A partir de estos datos, utilizando el toolbox de calibración referido, en el que se han introducido las características de la cámara calculadas en la fase previa de calibración, se obtienen las coordenadas métricas. Como único dato adicional, tan solo se requiere que el alumno introduzca la distancia entre la cámara y el plano de movimiento. El posterior tratamiento de los datos en una hoja de cálculo, permite obtener la representación gráfica de la posición en función del tiempo, y mediante ajustes, obtener el tipo de movimiento y las características del mismo. En la Figura 20 podemos ver los resultados obtenidos por un grupo de alumnos en un experimento, donde se analiza el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado de un cuerpo.

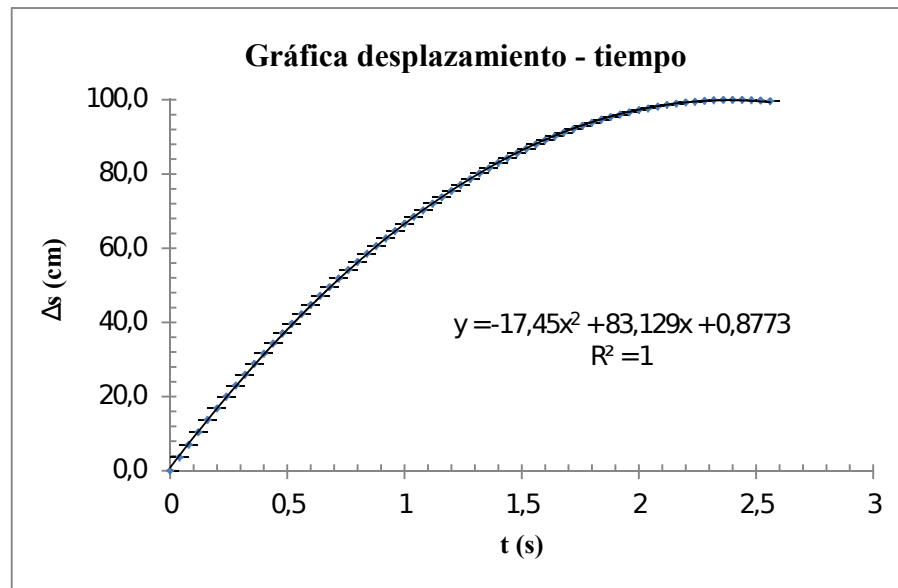


Figura 20: Resultado del ajuste a los datos obtenidos en la práctica del carril neumático.

5 Conclusiones

El vídeo digital es una nueva herramienta que se está desarrollando con las nuevas tecnologías y cada vez es de más fácil acceso. Su utilización es sencilla y permite muchas aplicaciones en el diseño de modelos dinámicos. Estas características hacen del vídeo un elemento motivador para el estudio del comportamiento de muchos sistemas, tanto a nivel básico como más avanzado. Por ello, es interesante su utilización como una herramienta útil en los laboratorios tanto de docencia como de investigación.

Agradecimientos

Jaime Riera pertenece al EICE E-MACAFI de la UPV.

Referencias

- [1] J.L. Barron, D.J. Fleet, S.S. Beauchemin, “Performance of Optical Flow techniques”, *International Journal of Computer Vision*, 12, 1, 43-77, 1994.
- [2] A. Bruhn, J. Weickert, C. Schnörr. “Lucas/Kanade Meets Horn/Schunck: Combining Local and Global Optic Flow Methods”, *International Journal of Computer Vision*, 61, 3, 211-321, 2005.
- [3] B. Lucas, T. Kanade, “An Iterative Image Registration Technique with Applications to Stereo Vision”, *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, Canada, 674-679, 1981.
- [4] S. Baker, I. Matthews, “Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework”, *International Journal of Computer Vision*, 56, 3, 221-255, 2004.
- [5] J. Riera, J.A. Monsoriu, M.H. Giménez, J.L. Hueso, J.R. Torregrosa. “Using image recognition to automate video analysis of physical processes”. *Am. J. Phys.* 71, 10, 1075–1079, (2003).
- [6] B. Horn, B. Schunck, “Determining optical flow”. *Artificial Intelligence*, 17, 185–203. (1981).
- [7] J. Riera, E. Parrilla, J.L. Hueso, “Object tracking with a stereoscopic camera: exploring the three-dimensional space”. *Eur. J. of Physics*, 32, 235–243, (2011).
- [8] B. Eichwald, M. Argentina, X. Noblin, F. Celestini, “Dynamics of a ball bouncing on a vibrated elastic membrane”. *Physical Review E*, 82, 016203, (2010).
- [9] W. Benenson, W. Bauer, “Frame grabbing techniques in undergraduate physics education”, *Am. J. Phys.*, 61 (9), pp. 848-851. (1993).
- [10] R. J. Beichner, “The impact of video motion analysis on kinematics graph interpretation skills”, *Am. J. Phys.*, 64, 1272–1277, (1996).
- [11] W. M. Wehrbein, “Using Video analysis to investigate intermediate concepts in classical mechanics”, *A. J. Phys.* 69 (7), 818-820, (2001).
- [12] J.Y. Bouguet, “Camera Calibration Toolbox for Matlab”, <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/index.html>, Retrieved april, 2012.