



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Medida y análisis de movimientos y vibraciones mediante
sistemas de bajo coste basados en visión artificial

Ana Belén Roig Hernández



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departamento de Óptica, Farmacología
y Anatomía



**Medida y análisis
de movimientos y vibraciones
mediante sistemas de bajo coste
basados en visión artificial**

Tesis Doctoral

Ana Belén Roig Hernández

Alicante, 2014

David Mas Candela, Profesor Titular del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alicante y Julián Espinosa Tomás, Ayudante Doctor de la Universidad de Alicante, certifican:

Que la presente memoria, titulada “Medida y análisis de movimientos y vibraciones mediante sistemas de bajo coste basados en visión artificial”, ha sido realizada, bajo nuestra dirección, por Dña. Ana Belén Roig Hernández y constituye su Tesis para optar al grado de Doctor por la Universidad de Alicante. Asimismo emitimos nuestra conformidad para que dicha memoria sea presentada y tenga lugar, con posterioridad, la correspondiente lectura.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Fdo. David Mas Candela

Fdo. Julián Espinosa Tomás

Alicante, 29 de Mayo de 2014



A mis padres,
a Nadal

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Agradecimientos

La realización de esta tesis, ha supuesto un esfuerzo colectivo de muchas personas que han participado directa o indirectamente leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, estando en los momentos de crisis y en los de felicidad, sin las que hubiera sido imposible desarrollar este trabajo. Por ello, es justo utilizar este espacio para expresarles mi agradecimiento.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis padres y a mi hermano por su apoyo en todo momento al hacer algo que me gusta. Igualmente, quiero agradecer a Nadal, la paciencia, el apoyo y el esfuerzo que siempre ha hecho por sacarme una sonrisa, especialmente en los momentos menos buenos. También, agradecer al resto de familiares en especial a mis abuelos y a mis amigos principalmente a Susi todo su apoyo.

Por supuesto, quisiera agradecer a mis directores David y Julián, todo el esfuerzo y el tiempo invertido durante todo este periodo, así como también los momentos de risa, que también los ha habido. No puedo dejar de agradecer su ayuda y colaboración siempre que ha sido necesaria, a Jorge, Belén, Begoña y Menchu. También a Chelo y al resto de profesores que me han permitido colaborar y adentrarme un poquito más en la labor docente. En este punto, me gustaría tener un agradecimiento y un recuerdo

especial al profesor Carlos Illueca, quien me permitió formar parte del Grupo de Óptica y Ciencias de la Visión, y quien siempre supo mostrar su experiencia en forma de buenos consejos.

No me puedo olvidar de mis compañeros de pasillo, Esther, Eli y Pablo por los buenos momentos compartidos y las conversaciones distendidas especialmente durante las comidas. Tampoco de Bárbara, por compartir los viajes en autobús de vuelta a casa y hacer que resultaran más cortos, ni de Elena porque aunque vive en el pasillo de arriba hemos pasado momentos agradables. Además, tengo que agradecer a Marta, mi compañera tanto durante la diplomatura como en el máster y ahora en nuestra tarea de estudiar inglés, su ánimo y los buenos ratos que llevamos compartiendo desde hace tanto tiempo.

Por último, dar las gracias a la Fundación Cajamurcia por su beca de investigación y su confianza en este proyecto, y al Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, por permitir mi incorporación en su programa de doctorado y por facilitar la realización de este trabajo.

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación obtenida con los siguientes proyectos:

- **Proyecto de I+D públicos**

- *“Métodos ópticos no invasivos para la medida de micromovimientos y oscilaciones” (GRE10-09)*

Duración 01/06/2011-31/05/2013

- *“Óptica y ciencias de la visión” (VIGROB-093)*

Duración 01/01/2012-31/12/2014

- *“Sistemas de bajo coste basados en imagen para la medida de vibraciones estructurales” (BIA2011-22704)*

Duración 01/01/2012-31/12/2014

- *“Diseño y aplicaciones prácticas de dianas para la detección de movimientos con precisión sub-píxel.” (GV/2013/009)*

Duración 01/01/2013-31/12/2013

Publicaciones

Esta Tesis Doctoral está basada en las siguientes publicaciones:

- Roig, A.B., Morales, M., Espinosa, J., Pérez, J., Mas, D., *“Pupil detection and tracking for analysis of fixational eye micromovements”*, *Optik*, **123** (11-15), 2012.
- Mas, D., Espinosa, J., Roig, A.B., Ferrer, B., Pérez, J., Illueca, C., *“Measurement of wide frequency range structural microvibrations with pocket digital camera and sub-pixel techniques”*, *Appl. Optics*, **51** (2664-2671), 2012.
- Espinosa, J., Mas, D., Pérez, J., Roig, A.B., *“Open-access operating algorithms for commercial videokeratographer and improvement of corneal sampling”*, *Appl. Optics*, **52** (24-29), 2013.
- Ferrer, B., Espinosa, J., Roig, A.B., Pérez, J., Mas, D., *“Vibration frequency measurement using a local multithreshold technique”*, *Opt. Express*, **21** (26198-26208), 2013.

Índice

Capítulo 1. Introducción	15
1.1 Sistemas de medida de vibraciones y desplazamientos	16
1.2 Técnicas de detección y seguimiento	22
1.3 Objetivo y método del trabajo	25
Capítulo 2. Métodos de seguimiento y detección sub-píxel.....	29
2.1 Medida de desplazamientos: Técnicas de seguimiento	29
2.2 Detección de vibraciones: Técnica multiumbral ...	42
Capítulo 3. Validación y aplicaciones de las técnicas de seguimiento	49
3.1 Validación de resultados.....	51
3.2 Técnicas de seguimiento aplicadas a dinámica ocular	55
3.2.1 Detección de movimientos de fijación.....	55

3.2.2 Análisis del reflejo pupilar a la luz	67
3.2.3 Calibración de un topógrafo corneal	82
3.3 Aplicaciones en ingeniería civil	91
Capítulo 4. Validación y aplicaciones de las técnicas multiumbral.....	99
4.1 Validación de resultados	99
4.2 Técnicas multiumbral aplicadas a ingeniería civil	106
Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas.....	111
Referencias	119
Anexo 1. La elipse y sus parámetros	131
Anexo 2. Operaciones morfológicas	135
Publicaciones.....	141

Capítulo 1. Introducción

La medida de pequeñas vibraciones y movimientos se ha convertido en un aspecto importante en muchos campos científicos como ingeniería civil, biotecnología, seguridad y vigilancia. El estudio de dichas vibraciones y pequeños desplazamientos puede proporcionar información relevante acerca del comportamiento de ciertos objetos o estructuras en determinadas condiciones y cómo se ven afectados por factores propios o externos a ellos. Por este motivo, es importante desarrollar métodos que nos permitan detectar dichos movimientos con la mayor precisión posible.

Además de la precisión, en muchas aplicaciones es interesante e incluso preceptivo el uso de métodos de medida no invasivos. Ya sea por limitaciones en el acceso al objeto de medida o por la propia naturaleza de éste, en ocasiones es necesaria la toma de medidas a distancia con lo que es interesante mejorar y desarrollar algoritmos capaces de obtener y analizar dichas vibraciones o movimientos. Los métodos de medida no invasivos, además de permitir realizar las medidas a una cierta distancia del objeto, evitan posibles alteraciones en los resultados ya que no están en contacto con la superficie de medida.

Dos de los campos donde resulta interesante el estudio de

vibraciones y pequeños desplazamientos y en los que centraremos nuestra atención son la ingeniería civil y la biomedicina, en concreto para el estudio de la dinámica ocular.

En ambos casos, las vibraciones están relacionadas con parámetros básicos del sistema. Tanto en el caso del ojo, para impedir molestias al paciente, como en el caso de la ingeniería, por la dificultad de acceso, resulta de gran interés desarrollar técnicas precisas de no contacto.

1.1 Sistemas de medida de vibraciones y desplazamientos

Por una parte, en el análisis de la dinámica ocular, se sabe que el ojo humano está constantemente en movimiento, incluso cuando intenta mantener un punto de fijación estable. Existen diferentes tipos de movimientos de fijación involuntarios e inapreciables a simple vista. Entre ellos se encuentran los microsacádicos que son los movimientos que presentan menor frecuencia, se producen 1 o 2 por segundo [Engbert, 2004]. Los trémores, por el contrario, son los movimientos de mayor rango de frecuencias entre 30-100 Hz pudiendo alcanzar hasta los 150 Hz [Spauschs, 1999]. El estudio de los parámetros que describen cada tipo de movimiento, entre ellos su frecuencia, es importante a la hora de conocer tanto la dinámica ocular normal, así como las alteraciones de la misma en

diferentes enfermedades. Además, resulta interesante y de gran utilidad a la hora de realizar cirugías refractivas, donde es muy importante que el paciente mantenga la fijación en un punto concreto.

Durante décadas, se han utilizados técnicas invasivas para detectar los movimientos oculares las cuales precisaban el uso de electrodos cercanos a la superficie ocular como es el caso del electro-oculograma (EOG). Esta técnica basada en la formación de un dipolo donde la córnea es el polo positivo y la retina el polo negativo, consiste en la colocación de electrodos en la piel cercana al ojo, de manera que gracias al ángulo que se forma entre dichos electrodos y el dipolo se pueden obtener los movimientos oculares [Marg,1951]. También se han empleado técnicas donde era necesario el contacto con la superficie ocular mediante una bobina (figura 1.1). En este caso, la bobina se encuentra dentro de un anillo flexible de silicona adherido al limbo del ojo y concéntrico a la córnea, mediante una lente de contacto [Collewijn, 1975; Kenyon, 1985]. Se inducen campos magnéticos alternantes y se genera una corriente alterna en la bobina. Registrando el potencial, se obtiene una señal proporcional al seno del ángulo formado entre la bobina y el campo magnético.

Debido a la necesidad de evitar el contacto con el ojo, donde resulta necesario el uso de sustancias para evitar daños en el mismo, se han desarrollado los métodos no invasivos, especialmente los métodos ópticos, basados en imágenes de la

superficie anterior de éste, como puede ser la vídeo-oculografía, o los “eye-trackers”. Estos últimos, se emplean en el estudio o control de la dirección de mirada mediante la medida de características perceptibles del ojo como pueden ser, la pupila [Porter, 2005], el iris [Chang, 2008], el limbo o mediante las imágenes de Purkinje [Cornsweet, 1973].

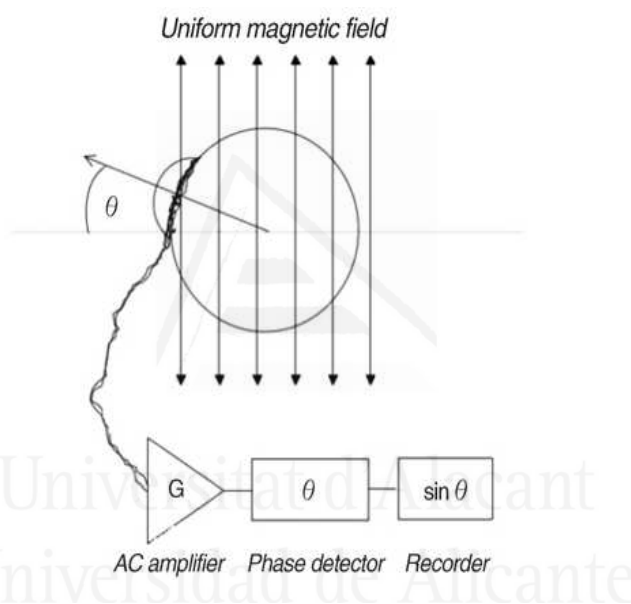


Figura 1.1 Esquema simplificado del dispositivo escleral “search coil”. El campo magnético uniforme y alterno (flechas verticales) inducen corriente alterna en la bobina cuando ésta se mueve [Toshiaki, 2008].

Por otra parte, el estudio de las vibraciones y desplazamientos que presentan las estructuras civiles viene motivado por la necesidad de medir la respuesta estructural para verificar su comportamiento bajo factores externos, como el tráfico, el viento o los terremotos. Dicho estudio se realiza principalmente para determinar cualquier

anomalía, incluyendo el efecto del tiempo, daños físicos específicos o el deterioro causado por el uso o el medio ambiente. Este deterioro que sufren las estructuras en muchas ocasiones requiere de un gran coste para su reparación o su reemplazo. Por tanto, monitorizar el estado de dichas estructuras así como la medida de sus vibraciones y desplazamientos bajo excitaciones dinámicas o impactos es un aspecto importante en ingeniería civil [Gentile, 2007], ya que permite evaluar la integridad de las mismas.

Pese a la importancia de la medida del desplazamiento, no se han encontrado buenas soluciones para todo el rango de frecuencias. Para frecuencias bajas (~80 Hz), las sondas diferenciales de variación lineal (figura 1.2) proporcionan un valor directo del desplazamiento. Sin embargo, estas sondas deben ser fijadas a la estructura que se va a medir y además deben ir ancladas a una estructura externa la cual debe ser suficientemente estable para evitar ruido en la medida del sensor. En ocasiones, esta disposición no siempre es posible, debido a razones de seguridad, restricciones del terreno o bien debido a la inaccesibilidad de la zona de medida, como por ejemplo en los viaductos, donde el tráfico puede verse afectado por la instalación de dispositivos invasivos. Estos problemas también pueden darse en estructuras de gran envergadura, como rascacielos, chimeneas industriales o grúas torre, por ejemplo. Por esta razón, son preferibles los sistemas de no contacto, entre ellos los métodos ópticos.



Figura 1.2 Sonda diferencial de variación lineal.

Existen diferentes sistemas de medida para detectar las vibraciones. Entre estos sistemas, los acelerómetros son uno de los más utilizados en diversas aplicaciones de ingeniería y en sistemas biométricos. Estos dispositivos registran la aceleración local en un punto específico donde se encuentran situados. Es un sistema de contacto y debe garantizarse que la masa de este dispositivo sea lo suficientemente pequeña como para no modificar la vibración que se desea medir. Su rango dinámico y su tasa de adquisición pueden ser muy altos, por este motivo son adecuados para múltiples aplicaciones. En general, se utilizan para analizar las frecuencias de vibración del objeto o las fuerzas que actúan sobre él. Sin embargo, si la intención es obtener una medida del desplazamiento real, es necesario realizar una doble integración de la señal proporcionada, lo que en ocasiones no es posible o resulta complicado debido a la presencia de ruido [Stiros, 2008]. Además, debido a la necesidad de estar en contacto con el objeto a medir, no es un método adecuado para muchas

aplicaciones en las que esto no es posible [Lee, 2007].

De forma similar a la medida de desplazamientos, para detectar las vibraciones que se producen en diferentes objetos los métodos no invasivos cobran una relevancia importante. Este tipo de métodos permiten la detección de las vibraciones que se producen en las estructuras desde una distancia determinada teniendo en cuenta el tipo de estructura, el entorno en el que se encuentra y el tipo de vibración que se desea registrar. Uno de los dispositivos de no contacto más comúnmente empleado es el vibrómetro láser. Este dispositivo mide la variación en la frecuencia de un rayo láser de referencia que enfoca a una superficie. Cuando esta superficie se desplaza, la frecuencia de la luz que se refleja varía debido al efecto Doppler. Aunque los resultados que proporciona son precisos, la distancia de medida debe ser relativamente corta debido a la atenuación y dispersión del rayo. Aunque son ampliamente usados, su principal inconveniente es el coste, ya que resultan extremadamente caros y en ciertas aplicaciones no son rentables [Nassif, 2005].

El desarrollo tecnológico en cuanto a dispositivos de visualización, como es el caso de las cámaras, posibilita su utilización como métodos no invasivos con un coste relativamente bajo. Así, han surgido como alternativa los métodos no invasivos para la detección de vibraciones basados en imágenes. En general, estos métodos se basan en el reconocimiento y seguimiento de un objeto a través de la correlación de una imagen digital. Con estos

sistemas es posible utilizar cámaras de alta velocidad para capturar las imágenes pero necesitan de una elevada resolución espacial para poder detectar pequeños cambios en la escena.

El uso de sistemas de alta resolución espacial y temporal está seriamente limitado por el hardware. La resolución del sensor está ligada a la velocidad de procesado; además, la electrónica presenta serias limitaciones a la hora de capturar, procesar y almacenar gran cantidad de datos simultáneamente. Por eso, dependiendo de la aplicación particular que se le vaya a dar a este tipo de cámaras, la mejora de la resolución de la misma puede no ser económica ni práctica. En ocasiones, se pueden emplear cámaras de gama baja, siempre teniendo en cuenta que, además de tener una resolución espacial y temporal limitadas, presentan otros problemas relacionados con la calidad del enfoque de la imagen, el elevado ruido ISO y el uso de algoritmos de compresión para mejorar las tasas de transferencia.

1.2 Técnicas de detección y seguimiento

Los métodos basados en imágenes, utilizan diferentes técnicas para la detección y el seguimiento de la imagen. Por ello, tras la obtención de las imágenes que se vayan a utilizar al aplicar uno de estos métodos, se puede optar por una de las diferentes técnicas. Las técnicas de seguimiento incluyen dos pasos básicos, el

primero de ellos el reconocimiento del objeto y el segundo la localización del mismo por medio de la obtención de sus características principales [Shortis, 1994; Shortis, 1995]. En concreto, el reconocimiento del objeto es el paso más complicado ya que requiere un análisis y segmentación correctos de la imagen. Este proceso se puede realizar de manera rápida y simplificada utilizando objetos específicos y fácilmente reconocibles [Bruckstein, 1998]. El primer paso para la localización del objeto en la escena, consiste en aislarlo del fondo de la imagen. Los modos más sencillos de realizar este paso son a través de una umbralización binaria, un recorte o una extracción de bordes. De todos los posibles objetos que podemos utilizar como diana en estas técnicas, los que presentan forma elíptica, incluyendo las circunferencias, son los más adecuados debido a que su forma se reconoce fácilmente y además mantienen su topología en todos los movimientos posibles [Nassif, 2005]. Una vez reconocido el objeto, se procede a localizar su posición en los sucesivos fotogramas de modo automático. La manera habitual de realizar esta tarea es a través de la correlación lineal.

A pesar de ser muy utilizada, la correlación lineal presenta ciertas desventajas o problemas que nos pueden dificultar la localización del objeto en cuestión. Mediante el uso de esta técnica se consiguen buenos resultados cuando la aplicamos en imágenes con textura mientras que, para imágenes con pocos detalles, los resultados no son tan satisfactorios. Por este motivo, hay que tener en cuenta que esta técnica es muy dependiente de la calidad

y del contenido de las imágenes debido a su sensibilidad tanto al ruido como al desenfoque de las mismas. Además, este tipo de técnicas llevan asociado un alto tiempo de procesado debido al tamaño de las imágenes y a su resolución, aunque se puede reducir definiendo una restricción geométrica.

Con el fin de aumentar la resolución de las técnicas de seguimiento se pueden utilizar las técnicas sub-píxel [Trinder, 1995]. Éstas son capaces de disminuir la incertidumbre en la posición del objeto, incluso por debajo de la unidad del píxel. Este tipo de técnicas presentan la ventaja adicional de que es posible proporcionar resultados precisos incluso con dispositivos de bajo coste.

Existen diferentes métodos para la localización sub-píxel del objeto que aislamos de una escena [Shortis, 1994; Trinder, 1995; Maalen-Johansen, 1993]. La opción más sencilla consiste en localizar el centroide o centro geométrico de una distribución de puntos. No obstante esta solución es poco sensible a pequeños cambios. Otra alternativa más precisa y con menos error consiste en considerar una diana de forma conocida y ajustar su contorno a una figura geométrica analítica. En ese caso, un pequeño cambio provocará cambios en el ajuste y serán detectados con facilidad.

Otra aproximación al problema consiste en analizar la respuesta de un único detector (píxel) en presencia de un borde. Normalmente, la luz dispersada por la superficie del objeto

presenta transiciones suaves, pero condiciones de iluminación adecuadas pueden producir cambios bruscos de luminosidad entre diferentes áreas definidas por diferentes pendientes, texturas, color o cualquier otra propiedad. El tamaño discreto del sensor en un CCD o CMOS, hace que el borde que define al objeto debido al cambio de luminosidad, caiga dentro de dicho sensor obteniendo dos regiones, una de ellas correspondería a la parte exterior del contorno del objeto y la otra a la parte interior del mismo, de este modo la respuesta dada depende del valor de cada región y del área cubierta por ellas. Estos píxeles son muy sensibles a cambios en la escena y un análisis apropiado de esta “región del contorno” puede proporcionar información muy útil sobre los movimientos del objeto.

Estos dos últimos métodos serán analizados con más detalle en el trabajo que se presenta.

1.3 Objetivo y método del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de técnicas sub-píxel para la medida de vibraciones y pequeños desplazamientos en diferentes estructuras mecánicas y biológicas. Dichas técnicas se basan en las imágenes registradas de la propia estructura a analizar. Se pretende desarrollar métodos para realizar las medidas de manera no invasiva, con la ventaja de

hacerlo a distancia y evitando así introducir alteraciones en los resultados. Los métodos basados en el software permiten compensar algunas de las limitaciones del hardware. Con tal propósito, queremos desarrollar un algoritmo capaz de detectar micromovimientos y vibraciones en un amplio rango de frecuencias, mediante el uso de cámaras digitales de bolsillo.

Entre las diferentes aplicaciones de estas técnicas, nos centraremos en el estudio de las vibraciones y movimientos tanto en estructuras civiles como para el estudio de la dinámica ocular. En primer lugar, se plantea el desarrollo de un algoritmo basado en la detección y seguimiento de un objeto elíptico. Para realizar el análisis de la dinámica ocular, se parte de la base que la pupila humana presenta una forma elíptica. Así, se propone aplicar este algoritmo para detectar los pequeños movimientos de fijación que realiza el ojo siguiendo las coordenadas del centro de la misma. La geometría de la pupila permite, además, analizar el reflejo pupilar ante un estímulo luminoso, y evaluar posibles diferencias entre el reflejo pupilar directo y el reflejo pupilar consensual, así como, entre el ojo dominante y el ojo no dominante.

Finalmente, se propone la adaptación del método para la detección de la elipse en el desarrollo de un algoritmo orientado a detectar los anillos de Plácido de un topógrafo corneal. Se pretende obtener una única ecuación característica del topógrafo a partir de su calibración mediante esferas de radio conocido. En cuanto al campo de la ingeniería civil, adjuntando el objeto con

forma de elipse como diana a una estructura y aplicando el algoritmo para el seguimiento de la misma, se medirán las vibraciones de la propia estructura, tanto en espacios controlados como en estructuras civiles en exteriores.

Tras el análisis con el algoritmo de detección de la elipse, se plantea el desarrollo de una nueva técnica sub-píxel para la medida de la frecuencia de vibraciones de objetos comunes sin el uso de dianas. Basándose en la variación de la intensidad luminosa en una región de la imagen debido a las vibraciones del objeto, la técnica cuantifica y extrae diferencias entre fotogramas sucesivos. Dicha técnica será validada experimentalmente en el laboratorio es decir, en un entorno controlado y posteriormente en estructuras civiles en espacios exteriores.

En todos estos procesos, además del desarrollo de los algoritmos es imprescindible diseñar dispositivos ópticos no invasivos para capturar las imágenes de los objetos en cuestión. Para ello, se diseñarán diferentes dispositivos, compuestos principalmente por cámaras que permiten registrar imágenes a alta velocidad. En muchas ocasiones, es posible el uso de cámaras de gama baja que permiten de igual manera el registro de las imágenes a alta velocidad aportando buenos resultados con un coste significativamente menor.

Capítulo 2. Métodos de seguimiento y detección sub-píxel

Como se ha comentado anteriormente, las técnicas sub-píxel aportan buenos resultados cuando se aplican en el reconocimiento de imágenes además de disminuir la incertidumbre en la posición del objeto por debajo del píxel. Por este motivo, son una buena alternativa a los métodos que utilizan una correlación lineal. Como el objetivo principal de este trabajo es desarrollar técnicas que permitan tanto la detección y seguimiento de objetos con forma elíptica como la medida de frecuencias de vibración, en este capítulo se van a realizar diversas simulaciones aplicando las dos técnicas que se proponen.

2.1 Medida de desplazamientos: Técnicas de seguimiento

Ya hemos mencionado que las técnicas de seguimiento incluyen dos pasos básicos, el reconocimiento del objeto y la localización del mismo [Shortis, 1994; Shortis, 1995]. Dichos pasos se basan en un análisis y segmentación correctos de la imagen. Este proceso se puede realizar de manera rápida y simplificada

utilizando objetos específicos y fácilmente reconocibles. Como se ha dicho anteriormente los objetos que presentan forma elíptica, incluyendo las circunferencias (figura 2.1), son los más apropiados debido a que forma es fácilmente reconocible [Nassif, 2005]. Así, obteniendo las características principales del objeto se pretende conocer el desplazamiento que se produce en diferentes estructuras.

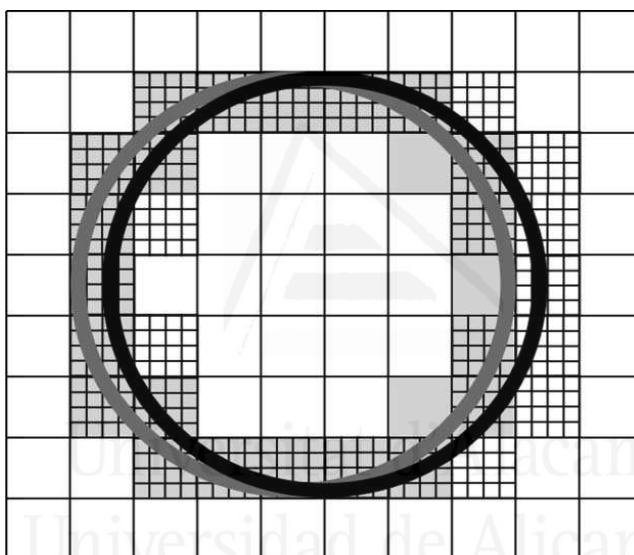


Figura 2.1 Objeto en el cual se basa el algoritmo de detección y seguimiento para aplicar las técnicas sub-píxel.

Si nos fijamos en la figura 2.1, la detección de la diana (línea negra) se realiza por los píxeles marcados con una cuadrícula. El desplazamiento de 0,5 px hacia la izquierda (línea gris) es detectado por un cambio de los píxeles activos que ahora serían los sombreados en color gris. Aunque la estructura no se ha movido un píxel entero, las restricciones geométricas de la diana

impuestas por la ecuación (2.1) (el contorno debe permanecer como una elipse) permiten trazar el nuevo contorno y obtener la nueva posición. Como se puede ver, un movimiento de 0,5 px cambia la estadística del conjunto total de los detectores activos y, aunque este desplazamiento de la diana sea más pequeño que 1 px, somos capaces de detectarlo, con lo que incrementamos la resolución nominal del sensor, la cual, según trabajos anteriores estaría alrededor de 0,08 px [Shortis, 1994].

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 ; \quad (2.1)$$

Los diferentes parámetros que definen la elipse proporcionan información acerca de la misma. Dichos parámetros se obtienen aplicando el método de mínimos cuadrados el cual se puede consultar en [Gal, 2013]. De esta manera, su centro que se obtiene por medio de la ecuación A1.6 del anexo 1, da información sobre la localización del objeto dentro del plano imagen. Su orientación, que se calcula según la ecuación A1.14 del anexo 1, informa sobre las rotaciones en el plano, mientras que la longitud de los ejes está asociada con los cambios reales en la forma (deformaciones) o proporciona información sobre rotaciones en torno a un eje contenido en el plano del objeto. Este último tipo de movimientos se pueden ver como un cambio en perspectiva y por tanto como una excentricidad aparente. La excentricidad indica el grado de desviación de una sección cónica con respecto a una circunferencia. En la elipse toma valores positivos entre 0-1. Así, cuanto más próximo a 0 más se acercará a una circunferencia.

El movimiento de un objeto sólido en el espacio tridimensional se puede descomponer en seis movimientos básicos: tres desplazamientos y tres rotaciones alrededor de los ejes de coordenadas. Tanto el centro como el ángulo de la elipse informan sobre cinco de estos seis movimientos básicos: dos desplazamientos y tres rotaciones alrededor de los ejes de coordenadas (figura 2.2).

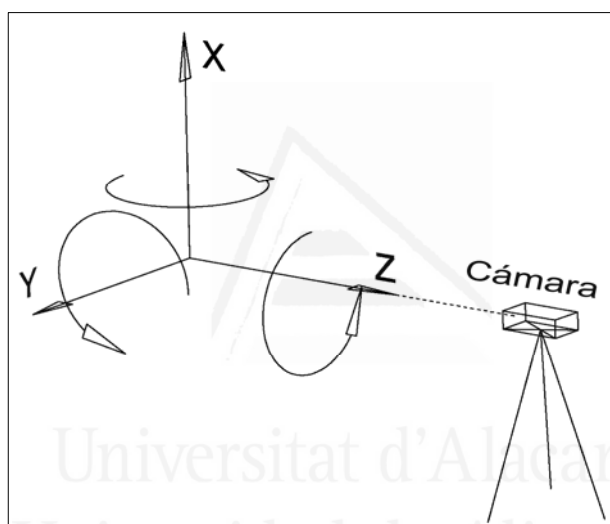


Figura 2.2 Posibles movimientos de un objeto en el espacio. Nuestro método permite la detección de cinco de los seis movimientos, sólo perdiendo uno a lo largo del eje de la cámara (eje z) debido a la constancia del aumento axial.

El desplazamiento que falta corresponde a los movimientos en la dirección perpendicular al plano imagen, que no son detectables a menos que provoquen un cambio notable en el tamaño del objeto. Hay que tener en cuenta, en todos los casos, que no es indispensable un enfoque perfecto de la diana ya que, el único requisito es la detección del contorno.

La precisión del método se ha probado antes de la obtención real de los resultados, mediante la realización de varias simulaciones numéricas. El objetivo es determinar la sensibilidad de los parámetros de la elipse tras el ajuste del contorno para detectar cambios sub-píxel. Para ello, hemos evaluado la respuesta al desplazamiento del centro, la variación de la forma (longitud de los ejes) y al cambio en la orientación de la elipse para diferentes tamaños de la misma. Se han implementado varias elipses en una matriz discreta mediante software y se han ajustado por mínimos cuadrados a la ecuación (2.1) para obtener el centro y el ángulo. Se han calculado la media del error, la desviación estándar y el error máximo entre los parámetros analíticos y los obtenidos a través del ajuste de la elipse. A pesar de que los tres errores proporcionan información importante acerca de la precisión en la determinación de los parámetros, la sensibilidad en el seguimiento del método debe ser determinada por el error más alto obtenido, que define el peor caso posible, pero asegura la detección en todos los casos.

La primera simulación se basa en el seguimiento del desplazamiento de diferentes dianas circulares cuyos diámetros toman valores entre 4 y 400 px. Estas dianas se desplazan un píxel completo en un total de 100 pasos. Con su ajuste, se obtienen las posiciones del centro de cada una de las dianas, y se comparan las posiciones teóricas de los mismos con las calculadas mediante la ecuación (A1.6). En la figura 2.3, se representa el error máximo, el error medio y su desviación

estándar.

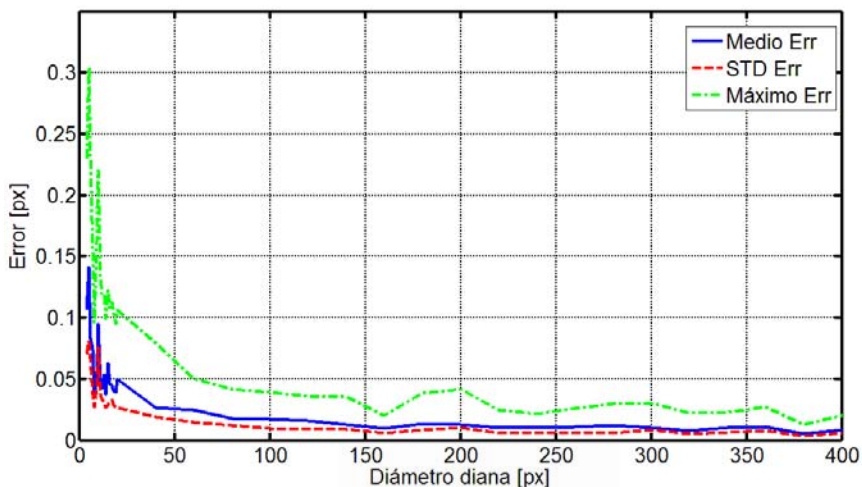


Figura 2.3 La precisión en la localización del centro de la diana para varios tamaños de circunferencia.

Como se puede observar, los tamaños pequeños presentan mayores valores del error. Este efecto es debido a la naturaleza discreta de la diana. En estos casos, la diana está muy pixelada y puede cambiar su forma con el desplazamiento [O’Gorman, 1990]. A medida que la diana aumenta de tamaño, la forma discreta se acerca más al caso analítico y por tanto el error disminuye. De esta manera, para diámetros mayores de 100 px, el error máximo en la determinación de la posición está por debajo de 0,05 px y disminuye lentamente con el tamaño, siendo incluso inferior a 0,025 px para tamaños de dianas por encima de 250 px.

La siguiente simulación se basa en el análisis de la precisión del método en la detección de cambios en la forma de la elipse. En este caso, se ha seleccionado una elipse cuyo eje vertical tiene un

tamaño de 80 px y el eje horizontal toma valores entre 4 y 400 px. El objetivo es evaluar la sensibilidad del método ante un cambio total de un píxel en el eje horizontal en pasos de 0,01 px. Para ello, se evalúa la desviación máxima, la desviación media y la desviación estándar del error estimado del eje.

En la figura 2.4, se puede apreciar que la determinación del tamaño del eje no es muy precisa, aunque si se obtiene una precisión sub-píxel. Resulta interesante resaltar, que cuanto más excéntrica es la elipse, la precisión que se obtiene es mejor. Conviene señalar que, tanto el error medio como el error máximo son relativamente altos, mientras que la desviación estándar es baja y constante. Esto significa que el ajuste no es muy preciso, pero hay poca variación en ese error. Por lo tanto, podría ser debido a un problema de error cero.

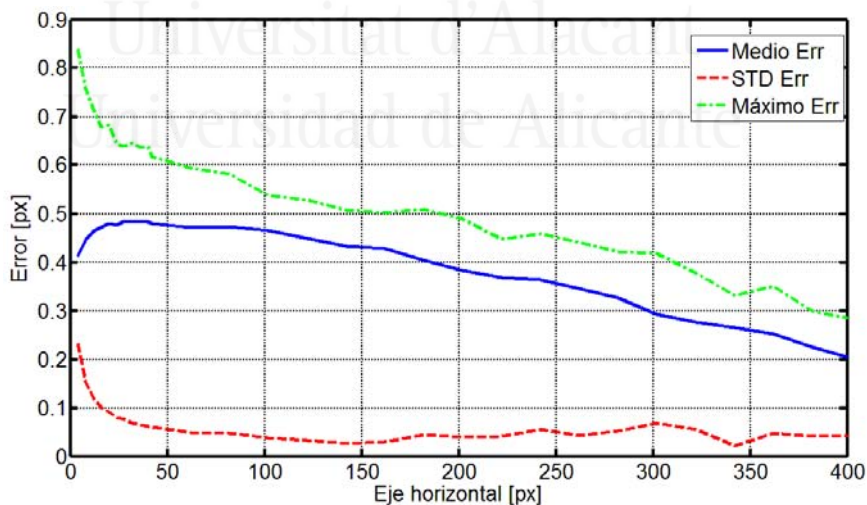


Figura 2.4 Precisión en la determinación del tamaño del eje para diferentes tamaños de dianas elípticas.

Hay que tener en cuenta que en muchas aplicaciones sólo se necesitan determinar cambios relativos. En ese caso, la exactitud del método no se establece con el error máximo absoluto, sino por la dispersión de la medida. Por lo tanto, tomando tres veces la desviación estándar del error se determina la variación máxima del mismo. En este caso, este criterio proporciona una precisión de 0,15 px, aunque el error en la determinación absoluta de la longitud del eje está por encima de 0,3 px.

Asimismo, se ha comprobado la capacidad de nuestro método para el seguimiento de las orientaciones de la diana (rotaciones en el plano de la imagen). Para llevar a cabo esta simulación se han tomado el mismo conjunto de dianas que en los casos anteriores: elipses con el eje vertical de 80 px y el horizontal toma valores entre 4 y 400 px. Cada una de las elipses se gira en sentido horario realizando 100 pasos de $0,01^\circ$ y se obtiene la diferencia entre el ángulo girado y el ángulo obtenido.

Los resultados muestran que estamos en condiciones de detectar rotaciones de hasta $0,025^\circ$ en elipses muy excéntricas. Si nos fijamos en la figura 2.5 en sentido de derecha a izquierda, podemos ver que, que a medida que la elipse se hace cada vez más circular el error aumenta lentamente. Para elipses cuya excentricidad está por debajo de 0,75 (entre 50 y 120 px), el error aumenta muy rápido y falla para círculos exactos (excentricidad igual a 0), ya que el ángulo de orientación no está bien definido para este caso y el valor angular obtenido no es fiable. Para una

longitud de eje, menor que 50 px la elipse es demasiado pequeña y, como en el caso de la diana circular, el error presenta un perfil irregular.

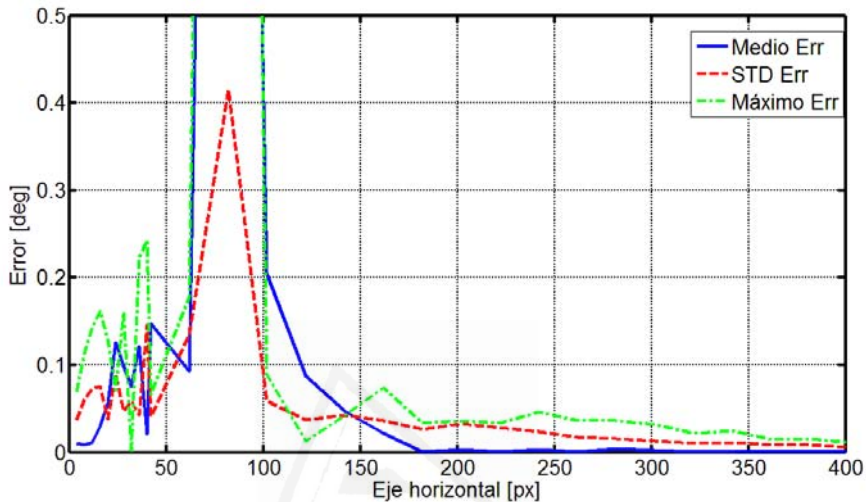


Figura 2.5 Precisión en la determinación de la orientación para diferentes tamaños de dianas elípticas.

Hemos evaluado el error cuadrático medio (MSE) de todos los ajustes de la elipse, es decir MSE de la distancia entre los píxeles reales y la elipse ajustada. Para elipses cuyo eje mayor está por encima de 120 px, el MSE está por debajo de $1,5 \times 10^{-4}$ px. En el caso de la diana circular y la simulación de la localización de la diana, el valor fue incluso menor a $0,5 \times 10^{-4}$ px para diámetros mayores de 160 px. En casos ideales como los que aquí se presentan, el MSE no proporciona información importante, sin embargo, en los casos reales, los aumentos repentinos de este parámetro pueden mostrar una distorsión en la forma, que pueden estar causados por errores en la extracción de la diana de la escena. Un bajo valor de MSE garantiza la fiabilidad del proceso.

En esta última simulación, se analizará el efecto que tienen los algoritmos de compresión que aplican las cámaras de gama baja sobre dianas circulares. Cuando el contorno de la diana es una línea delgada y su movimiento entre fotogramas es muy pequeño, la línea que forma dicho contorno aparecerá rota y con ruido, debido a los algoritmos de compresión, aunque ésta puede ser reconocida fácilmente (figura 2.6). El efecto de mosaico debido a la compresión JPEG disminuye la precisión del ajuste ya que aumenta la cantidad de puntos dispersos. Por este motivo, aplicaremos las técnicas sub-píxel a dianas circulares, pero introduciendo esta vez un modelo simple de ruido para ver cómo se ven afectados los resultados y se evaluará el desplazamiento de las coordenadas del centro de las mismas.



Figura 2.6 Imagen de la diana circular tomada con una cámara de gama baja, donde se observa la dispersión en el contorno de la misma debido a la compresión JPEG de la cámara.

La posición y orientación del objeto se obtienen tomando la posición de cada píxel excitado en la imagen y ajustando el

conjunto a una elipse. Por tanto, cualquier píxel fuera de la línea teórica contribuirá a incrementar el error del ajuste. Este efecto de ruido se ha modelado para empeorar las coordenadas de cada punto mediante una distribución uniforme del ruido aleatorio. Considerando el efecto que sobre las líneas de contorno producen las limitaciones de la cámara (ruido ISO, desenfoque de la imagen y compresión) éste se puede reducir a un problema de definición de las líneas. Así una línea menos definida presentará una distribución de puntos más dispersa. La definición de la línea simplemente es cuestión de densidad de puntos. En la figura 2.7, se pueden ver como ejemplo dos dianas formadas por dos cantidades de puntos diferentes, y afectadas por el mismo nivel de ruido. En ambos casos, aunque que dicha dispersión proporciona formas muy ruidosas, a pesar del desenfoque y el ruido se puede reconocer claramente la línea. Por eso, pensamos que nuestro modelo de ruido es suficientemente preciso para determinar los límites teóricos de nuestra propuesta. Si se consideran las coordenadas de cada píxel del contorno (x,y) , se les añade una cantidad de ruido de acuerdo con:

$$(x', y') = (x + rnd(\omega), y + rnd(\omega)); \quad (2.2)$$

donde $rnd(\omega)$ genera un número pseudoaleatorio en el intervalo $[-\omega/2, \omega/2]$ siguiendo una distribución de probabilidad uniforme.

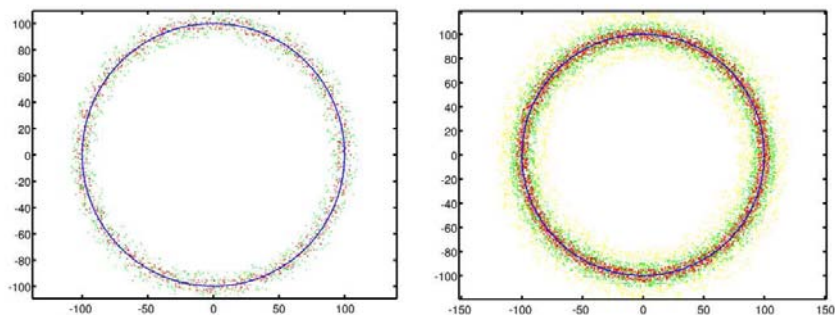


Figura 2.7 Dianas formadas por diferente cantidad de puntos y afectadas por el mismo nivel de ruido. En ambos casos a pesar del desenfoco y el ruido se puede reconocer el contorno.

Para realizar la simulación se han implementado dianas circulares de diferentes tamaños y con un contorno de 1 px de grosor que se ha ajustado a una elipse por mínimos cuadrados según el Anexo1.

En la simulación generada la diana se desplaza 1 px completo horizontalmente en pasos de 0,005 px y los contornos generados son de nuevo ajustados según la ecuación (2.1) para obtener las nuevas posiciones de los centros. El proceso se repite para diámetros que van desde 10 a 200 px y para diferentes niveles de dispersión, según la expresión (2.2). A continuación, se calculan las diferencias absolutas entre las posiciones teóricas y las posiciones estimadas y se obtiene la distribución del error de localización para cada diámetro. La precisión del método se establece en tres veces la desviación estándar de la distribución del error. Aunque este es un criterio muy conservador, la estimación de la posición por encima de este nivel de error garantiza la correcta posición del objeto.

En la figura 2.8, se representan los resultados para las simulaciones libre de ruido ($\omega=0$ px), $\omega=2$ px y $\omega=5$ px. Se puede ver que para dianas circulares con un diámetro mayor de 100 px, el error de localización es menor de 0,2 px incluso para un nivel alto de ruido. Si se logra un filtrado correcto de la imagen y se obtiene una línea de contorno de 1 px de grosor, el cual es equivalente a un objeto libre de ruido, la localización puede ser menor de 0,05 px para diámetros mayores de 30 px y menor de 0,02 px para diámetros mayores de 100 px. Esto significa, una mejora de 20 a 50 veces la resolución nominal del sensor de la cámara. Por tanto, una relación píxel/milímetro adecuada puede proporcionar una precisión micrométrica.

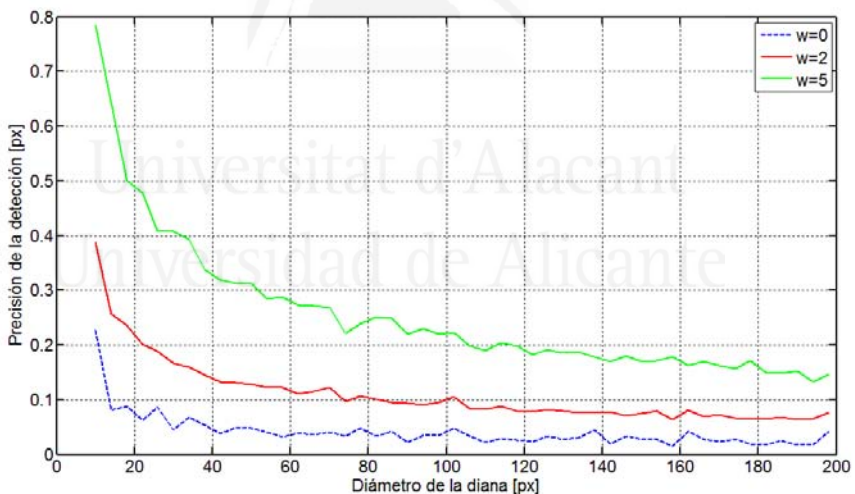


Figura 2.8 Precisión sub-píxel del método para diferentes niveles de ruido. Se representa la precisión en la detección (eje Y) frente al tamaño de la diana (eje X). La apariencia irregular de la gráfica es debida a la naturaleza discreta de los cálculos.

2.2 Detección de vibraciones: Técnica multiumbral

El funcionamiento de las técnicas multiumbral para la localización sub-píxel de un objeto resulta sencillo si se considera la respuesta de un único detector (píxel) cuando detecta un borde. Sabemos que la umbralización de una imagen digital proporciona un número de píxeles cuya iluminación es igual o está por debajo de un valor dado. El resultado que se obtiene de dicha operación es una imagen binaria cuya apariencia está relacionada con la geometría del objeto y la estructura de la iluminación.

Los movimientos del objeto cambian la distribución de la luz en la escena y por tanto la posición de los bordes de la imagen binarizada, produciendo cambios en algunos píxeles, aunque este movimiento sea menor que el determinado por el tamaño físico del sensor. La detección de estos cambios proporciona información del movimiento a escala sub-píxel. Esto ocurre siempre y cuando la matriz de píxeles sea lo suficientemente grande.

Si se considera un objeto binario como el de la figura 2.9(a), se puede ver que al ser capturada la imagen por la matriz de un sensor discreto, las zonas ocupadas por la imagen responden (valor del píxel=1) y ésta es detectada, mientras que, los píxeles vacíos no responden (valor del píxel=0). Si nos fijamos, los bordes representados por áreas grises, aunque sólo ocupan una parte del

área del sensor, la respuesta de los sensores es 1 independientemente de la cantidad de área ocupada.

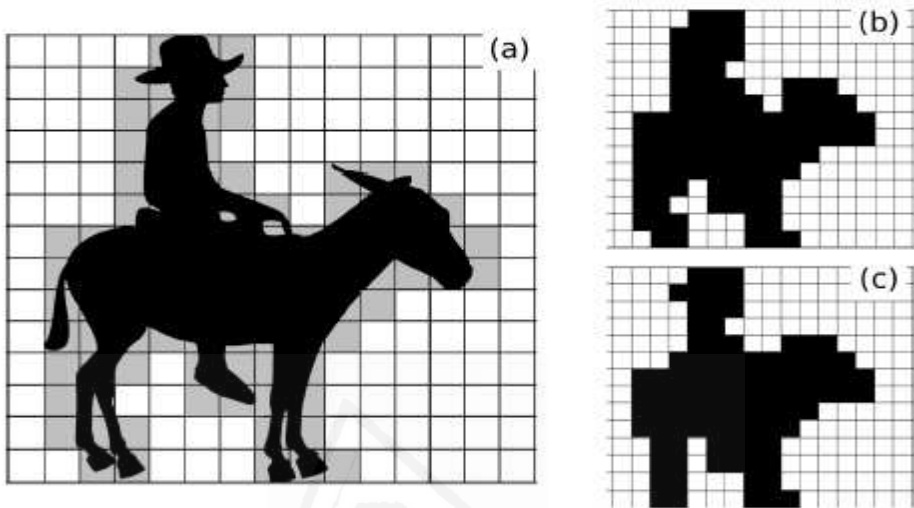


Figura 2.9 (a) Escena de un objeto binario. Los píxeles del borde están marcados en gris; (b) escena en (a) después de una cuantización espacial; (c) escena en (a) después de un desplazamiento horizontal de 0,25 px.

Si ahora nos fijamos en la figura 2.9(b), donde se muestra el resultado de la imagen tras la discretización, se puede ver que el perfil del objeto ha sido degradado y, aunque el contorno es similar al del objeto original, su forma no es exacta. Cuando el objeto se mueve ligeramente, el área ocupada en algunos píxeles del borde cambia y por tanto también el contorno del objeto. En la figura 2.9(c), se muestra la situación de la imagen después de un desplazamiento lateral de 0,25 px hacia la derecha. Se puede ver que incluso con un desplazamiento tan pequeño los cambios en la forma del objeto comparando ambas imágenes son evidentes.

En objetos reales, la binarización de la imagen produce mucho ruido debido a reflejos, a la textura de la superficie o debido a la poca uniformidad del fondo. Sin embargo, si el objeto no se mueve de manera aleatoria sino que vibra, existe un patrón periódico que se puede detectar, lo que hace posible la eliminación del ruido y por lo tanto la posterior obtención de la frecuencia de vibración.

Hasta ahora, nos hemos referido sólo a objetos binarizados, mientras que las escenas suelen estar en escala de grises o en color. La solución más simple a este problema es el uso de escenas binarias, las cuales se pueden lograr uniendo una diana binaria al objeto o el uso de zonas saturadas y otras no de la escena como dianas [Mas, 2010(A); Ferrer, 2011]. Debido al hecho que los objetos son más complejos y presentan un amplio rango dinámico, estas soluciones no siempre son posibles. La reducción del rango dinámico de las imágenes siempre causa problemas, ya que suelen aparecer falsos contornos que pueden distorsionar la forma original de la diana y enmascarar el movimiento. Por lo tanto, hay algunos criterios que se deben seguir con el fin de obtener una imagen binaria adecuada. Aquí, por simplicidad, consideraremos las imágenes en escala de grises.

La primera operación que se realiza a este tipo de imágenes consiste en su reducción a imágenes binarias seleccionando un umbral adecuado de acuerdo con el histograma, los valores estadísticos (máximo, mínimo, mediana...) o cualquier otro criterio. Hay que tener en cuenta, que como estamos buscando

movimientos sub-píxel, los cambios pueden ser sólo perceptibles en pequeños destellos brillantes, grises medios o zonas oscuras. Por lo tanto, es difícil conocer que niveles de gris se verán afectados.

De esta manera, en lugar de hacer modelos y predicciones sobre cambios de iluminación debido al movimiento, se propone partir del algoritmo desarrollado para la detección de la elipse, y desarrollar un algoritmo que nos permita estudiar los cambios de un píxel para diferentes niveles de luminancia, sin la utilización de dianas o cualquier objeto de referencia. Para eso, nos valdremos de una umbralización multinivel. Si el objeto que se considera vibra, es muy probable que varios niveles de luminancia estén afectados por dicha vibración, por tanto se obtiene información redundante de ese objeto. Los niveles restantes tendrán información inútil cuyo efecto final será ruido de fondo, que degradará la señal. Una composición adecuada del espectro de potencia de todos los niveles, obtenidos a partir de su transformada de Fourier, realza los picos de frecuencia correspondientes a la vibración permitiendo detectarla claramente.

Por lo tanto, lo que se pretende es obtener secuencias de imágenes del objeto a analizar y umbralizar cada fotograma en diferentes niveles, para obtener la variación en el número de píxeles que cambian con respecto al primer fotograma. Dicha variación se analiza mediante la transformada de Fourier para cada nivel y se obtiene información que después se utiliza para eliminar el ruido presente y determinar la vibración principal

[Ferrer, 2013; Espinosa, 2013].

Como es lógico, la mayor cantidad de información se obtiene cuando se utilizan todos los niveles de la imagen. Sin embargo, esto conduce a algoritmos ineficientes en tiempo y en uso de memoria. Por esta razón, una selección adecuada de los niveles, acelera los algoritmos y también incrementa la ratio entre la señal y el ruido. La opción más fácil es tomar un número reducido de niveles entre el mínimo y el máximo. En este trabajo se tomarán 8 niveles igualmente espaciados. La selección del número de niveles es arbitraria y depende mucho de la luminancia de la escena y de la reflectividad del objeto. Se puede partir con ventaja, si se utiliza una iluminación especial o si se seleccionan detalles que tienen más probabilidad de cambiar con el movimiento y, por tanto, hacer que algunas áreas brillen más o forzar algún punto de reflejo en la superficie en movimiento para facilitar el análisis. Desafortunadamente, esto no siempre es posible y por tanto la umbralización multinivel se debe adaptar a experimentos particulares.

Tras realizar la umbralización, el siguiente paso consiste en contar los píxeles activos en cada nivel binarizado y comparar este número con su correspondiente número para el mismo nivel del primer fotograma. De esta manera, obtenemos la variación de píxeles durante la secuencia. Al final del proceso, se obtiene un único resultado para la señal obtenida de cada nivel. Estas señales se componen en una sola mediante un promedio o un

producto. Esta composición hace que la técnica sea más robusta ya que realza los picos comunes mientras elimina el ruido aleatorio. Por lo tanto, el método debe proporcionar resultados precisos incluso en presencia de un fuerte ruido.

El método que aquí se propone sólo pretende detectar frecuencias de vibración y no realizar un seguimiento del objeto. Por eso, se basa en la suma de los valores de todos los píxeles dentro de un área binarizada y no en una localización específica de cada posición del píxel. Además, sólo unos pocos cambios de un píxel son debidos a un movimiento, y por tanto, el ruido o los cambios indeseados en la escena enmascaran la señal de la vibración.

Por esta razón, se selecciona una región de interés alrededor de la zona donde será más probable detectar el movimiento. De esta manera, se excluyen partes de la escena que no aportan información relevante y el ratio entre los cambios del píxel debido al movimiento y el ruido del fondo también se incrementa. No obstante, al aplicar dicha técnica en áreas muy pequeñas debemos asegurarnos que en esa área, el histograma es lo suficientemente ancho para garantizar la presencia de varios niveles de gris que llevan diferente información que puede ser analizada. Evidentemente, otra de las ventajas que proporciona la selección de áreas pequeñas en la imagen, es la disminución del tiempo de procesado.

Capítulo 3. Validación y aplicaciones de las técnicas de seguimiento

Antes de proceder a realizar los experimentos pertinentes, es conveniente comprobar la resolución de nuestro sistema, validando nuestras hipótesis, tras la realización de las simulaciones explicadas en el capítulo anterior. Para ello, en los capítulos que siguen, se realizan medidas en entornos controlados y se aplican los métodos desarrollados, tanto el algoritmo de seguimiento de una diana para la detección de desplazamientos, como el algoritmo multiumbral para detectar vibraciones.

La frecuencia de adquisición de las cámaras utilizadas a lo largo de este trabajo, se ha comprobado utilizando la frecuencia de la corriente eléctrica. La corriente de la red eléctrica general en Europa es alterna con una frecuencia de 50 Hz, siguiendo un esquema sinusoidal. Dado que se produce un efecto de "rectificación de la corriente" el voltaje efectivo que calienta el filamento incandescente es el que se muestra en la figura 3.1. En cada período de voltaje existen dos fases de apagado ($V=0$), lo que produce un efecto estroboscópico en la iluminación con una frecuencia de oscilación de 100 Hz¹. La frecuencia de la luz eléctrica no es totalmente estable debido a los cambios de fase

¹ <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>. Policy 1 y Appendix 1. Fecha de acceso 09-04-2014.

continua, sin embargo la media está muy cercana a los 50 Hz presentando una variación de no más de un 0,04% [Red Eléctrica Española, 2013]. De manera que cualquier variación por encima de este valor que encontremos será debida a la cámara. La señal que se analiza es la variación de la intensidad de la luz sobre una superficie difusora. Tras realizar la media de cada fotograma, la oscilación de la cantidad de luz se verá reflejada en la evolución del valor medio y aunque no sea una señal senoidal pura se espera que sea periódica con una oscilación de 100 Hz. Al analizar la transformada de Fourier, los cambios deberían estar perfectamente localizados en el dominio de frecuencias mediante un pico agudo de base estrecha en la frecuencia de 100 Hz. Para las cámaras profesionales, se ha detectado claramente la oscilación de 100 Hz, sin embargo en el caso de las cámaras de gama baja, tras este análisis, se han observado que existen ciertas imprecisiones en la velocidad de adquisición, de manera que los picos obtenidos presentan una base ancha. De todas maneras, el error en la localización del pico es menor del 1%, así que podemos considerar que dichas cámaras son suficientemente precisas para realizar este tipo de experimentos.

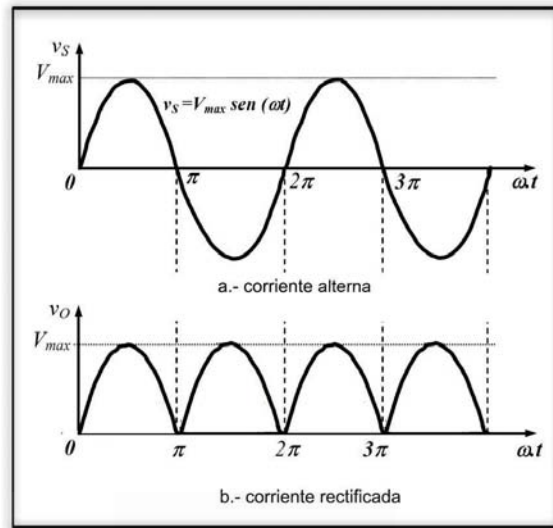


Figura 3.1 Esquema de corriente alterna y rectificadas.

3.1 Validación de resultados

Para validar los resultados obtenidos en el caso de las técnicas de seguimiento de una elipse tras realizar las simulaciones, se desarrolla un experimento en laboratorio basado en el seguimiento de una diana circular y en el cual nos centraremos en el análisis de las coordenadas del centro de la elipse, ya que, permite la detección de desplazamientos laterales.

Por tanto, para comprobar los resultados de nuestro método, se registra una secuencia de una diana circular en movimiento con dos cámaras, una de uso comercial Casio Exilim EX-FH20, la cual

trabaja a una velocidad de 420 fotogramas por segundo (fps) con una resolución espacial de 224 x 168 px, mientras que la cámara de uso profesional AOS-XPri, trabaja a una velocidad de 250 fps con una resolución de 800 x 560 px. Esta última cámara utiliza un objetivo Navitar Zoom 7000 para poder enfocar el objeto mientras que la Casio usa el objetivo que lleva incorporado. Ambas cámaras, están apoyadas sobre unos trípodes que proporcionan mayor estabilidad en las medidas realizadas.

La diana circular con un diámetro de 5 cm se sitúa a 10 m de ambas cámaras y se desplaza manualmente en dirección horizontal con un tornillo micrométrico, un desplazamiento total de 1 mm hacia la izquierda y hacia la derecha. Aunque el desplazamiento se realiza de manera continuada exceptuando las pausas debidas a la rotación manual del tornillo, se podría haber realizado el mismo desplazamiento, en 10 pasos de 0,1 mm que es el mínimo desplazamiento que permite el tornillo. Como dicho movimiento no está totalmente controlado, no se puede utilizar información adicional de la trayectoria para disminuir el error, por consiguiente, la estimación de la precisión se realiza en el peor de los casos. El factor de conversión para la distancia de medida es de 1,25 px/mm para la cámara AOS y de 0,42 px/mm para la Casio.

En la figura 3.2, se muestra un fotograma de los vídeos capturados por ambas cámaras. En el primer caso (figura 3.2(a)), la secuencia capturada por la cámara AOS se almacena sin

compresión, por eso, una secuencia cuya duración es de 10 s ocupa un espacio alrededor de 1 GB, mientras que en el segundo caso (figura 3.2(b)) se almacena con una compresión AVI-JPEG RGB que produce una degradación de cada fotograma. Esta secuencia, de la misma duración que la anterior, ocupa unos 70 MB. Esta diferencia, hace que el manejo y el procesado de las secuencias de la cámara Casio sea más rápido, pero a costa de la degradación de la calidad de la imagen.

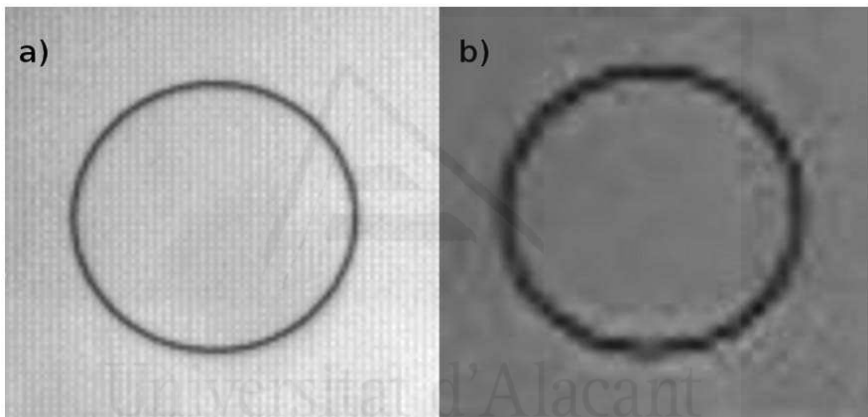


Figura 3.2 Secuencias de vídeo para el seguimiento del objeto. (a) Secuencia para la cámara AOS, sin compresión 8 bits formato AVI. (b) Secuencia para la cámara Casio, en formato AVI-JPEG RGB. Esta última secuencia se ha ampliado y ecualizado para mejorar la visualización.

Una vez se han obtenido las secuencias, se aplican técnicas de procesado de imágenes para obtener el contorno de la elipse en cada una de ellas. Para ello, se selecciona un umbral adecuado para el fotograma de acuerdo al nivel del fondo y se binariza. La imagen binaria que se obtiene se filtra mediante una apertura

morfológica (A2.3) y se detecta el contorno por medio de una función de detección de bordes [Mathworks, B]. El contorno final se ajusta a la ecuación (2.1) y se calcula su centro según la ecuación (A1.6).

Aunque el desplazamiento de la diana apenas puede ser apreciado por el ojo humano, el método es capaz de detectar el movimiento de la misma. En la figura 3.3, se muestra la coordenada horizontal de las secuencias de ambas cámaras. Como se puede comprobar, a pesar de las diferencias en resolución y en la calidad de la imagen, ambas cámaras son capaces de detectar la posición del objeto. Tal como se esperaba, la señal de la cámara Casio es más ruidosa pero completamente reconocible. Incluso se puede apreciar que ambas cámaras reconocen las pequeñas pausas debidas a la rotación manual del tornillo micrométrico.

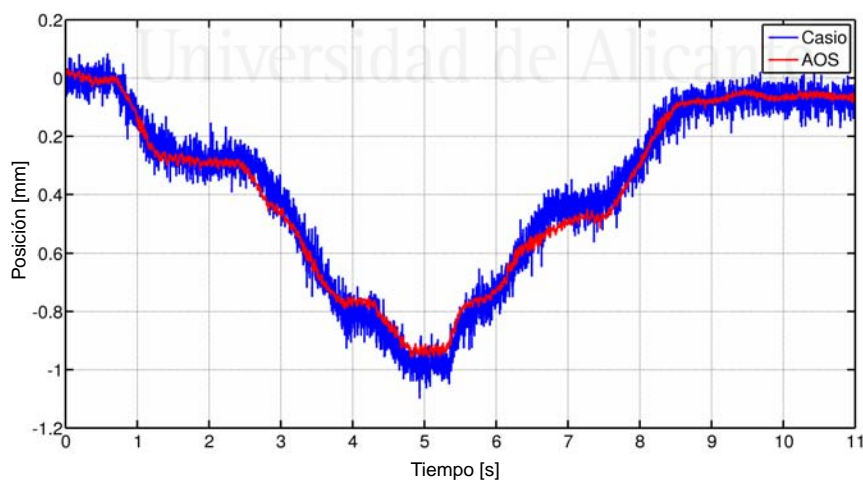


Figura 3.3 Posición de la diana obtenida a partir de las secuencias de la figura 3.2 para las dos cámaras.

La precisión sub-píxel la determinamos a partir de los últimos 2 s de la señal, donde la diana permanece estática, tomando tres veces la desviación estándar de la posición durante el último segundo. Obtenemos una resolución de 0,15 mm para la cámara de bolsillo, y una resolución de 0,03 mm para la profesional. En ambos casos, el método es capaz de detectar variaciones en torno a 0,05 px. Considerando que las dianas tienen diámetros de 24 px para la Casio y de 63 px para la AOS, la precisión de los valores obtenidos son congruentes con los valores teóricos presentados en la figura 2.8 para dianas libres de ruido.

3.2 Técnicas de seguimiento aplicadas a dinámica ocular

3.2.1 Detección de movimientos de fijación

Dentro del estudio de la dinámica ocular, existen diferentes técnicas de seguimiento para detectar los micromovimientos oculares. Dichas técnicas, durante las últimas décadas, han sufrido un gran avance, pasando de métodos rudimentarios e invasivos como el electro-oculograma [Marg, 1951] o la técnica “search coil” [Robinson, 1963; Collewijn, 1975; Ferman, 1987] a métodos no invasivos como los sistemas de vídeo-oculografía [Scherer, 1991].

La técnica conocida como “search coil” se basa en la inducción de un campo magnético en una bobina. La bobina de inducción se encuentra dentro de un anillo de silicona flexible el cual se adhiere al limbo del ojo humano concéntrico a la córnea por medio de una lente de contacto [Collewijn, 1975; Kenyon, 1985]. Los voltajes inducidos en la bobina proporcionan datos sobre las posiciones horizontales y verticales de los ojos, así como también de las ciclorsiones. Aunque es un método altamente invasivo se considera el “gold standard” para la medida de movimientos oculares.

El electro-oculograma (EOG) es una técnica basada en la diferencia de potencial existente entre la córnea y la membrana de Bruch. El origen de dicha diferencia está en el epitelio pigmentario de la retina de manera que se origina un dipolo donde la córnea corresponde al polo positivo mientras que la retina representa al polo negativo. Teniendo en cuenta este concepto de dipolo, si colocáramos electrodos en la piel cercana al ojo podríamos conocer los movimientos oculares gracias al ángulo que se forma entre el dipolo con respecto a dichos electrodos [Marg, 1951].

En cuanto a los métodos no invasivos para el estudio de la dinámica ocular, donde podemos incluir a la vídeo-oculografía, existen los sistemas utilizados para el estudio o control de la dirección de mirada, que determinan cuando y donde se produce la fijación. Estos dispositivos se conocen como “eye-trackers”. Estos métodos se basan en la medida de diferentes zonas del ojo

como pueden ser, la pupila [Porter, 2005], el iris [Chang, 2008], el limbo o mediante las imágenes de Purkinje [Cornsweet, 1973].

Como ya se ha mencionado, el objetivo principal en la evolución de los métodos para el estudio de la dinámica ocular, es desarrollar técnicas precisas que no necesiten estar en contacto con la superficie ocular evitando así molestias a los pacientes.

Por tanto, a fin de detectar los movimientos oculares de fijación de cinco sujetos, nos basaremos en los principios de un método no invasivo como es la video-oculografía para diseñar nuestro experimento. Se utiliza una lámpara de hendidura (figura 3.4(A)) Haag-Street style (SL-900) para iluminar la superficie anterior del ojo derecho de cada sujeto, del cual se registraran tres secuencias de la región de la pupila, mientras el ojo izquierdo permanece ocluido. Dichas secuencias se registran por medio de una cámara de alta velocidad (AOS Technologies AC) acoplada a la lámpara de hendidura que trabaja a una velocidad de 63 fps y con una resolución de 800 x 560 fps (figura 3.4(B)). Aunque la velocidad a la que se toman las secuencias no es muy alta, se necesita que la frecuencia de muestreo temporal sea muy estable, lo que justifica el uso de este tipo de cámara. Las secuencias obtenidas se almacenan en un ordenador portátil (figura 3.4(C)) al cual está conectada la cámara.

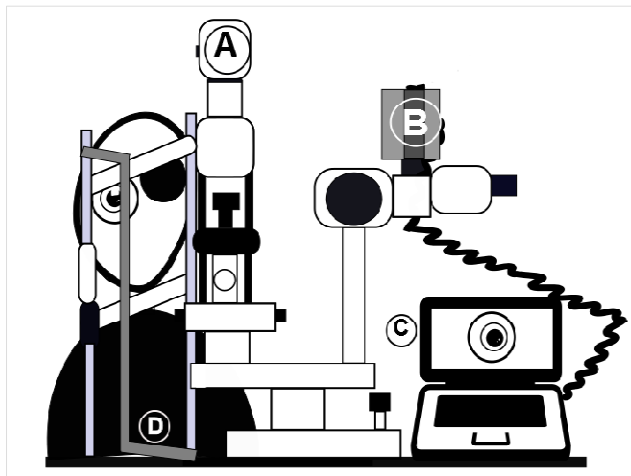


Figura 3.4 Esquema del montaje del sistema utilizado. Lámpara de hendidura (A), cámara de alta velocidad (B), ordenador (C), barras de refuerzo (D).

Con el propósito de observar bien la región de interés y obtener una iluminación uniforme de toda la córnea se emplea iluminación difusa, colocando la hendidura lo más ancha posible y un aumento de 16X. También se usa un filtro rojo con objeto de poder aumentar la iluminación al máximo consiguiendo mejor visión de la región y evitando molestias a los sujetos. Además, para prevenir posibles reflejos del sistema de iluminación del laboratorio, así como de la luz procedente del exterior, las medidas se realizan en absoluta oscuridad. Como punto de fijación donde el sujeto debe dirigir su mirada durante el tiempo de duración de las medidas se utiliza un LED rojo.

Dada la importancia de impedir movimientos residuales de la cabeza se toman una serie de precauciones, como la sujeción de la misma a la estructura de la mentonera, así como la utilización

de un mordedor dental. Dicho mordedor dental se realizó empleando resinas dentales tipo Godiva, utilizadas en odontología, las cuales se moldean a 50° según la forma de la dentadura del sujeto que queda fijada una vez se enfría la resina. Asimismo, se minimizan o evitan los movimientos de la estructura, reforzando la mentonera mediante unas barras laterales como se puede ver en la figura 3.4(D). Por último, durante los 10 segundos de duración de cada secuencia se les indica a los sujetos que eviten respirar.

Una vez obtenemos las secuencias, éstas se analizan “off-line”. El objetivo principal de nuestro algoritmo es detectar el contorno de la pupila en todos los fotogramas y ajustarlo a una elipse. Para ello, el primer paso consiste en seleccionar un valor umbral de binarización. Así, obtenemos una región negra, correspondiente a la pupila que será nuestra región de interés. En el siguiente paso, para eliminar el ruido presente en la imagen que pudiera dificultar la detección del contorno de la pupila [Serra, 1983] se aplica el operador morfológico de cierre (A2.4). Finalmente, mediante la aplicación de una función para la detección de bordes podemos obtener dicho contorno. En ocasiones, el reflejo producido por el sistema de iluminación puede aparecer próximo al borde de la pupila (figura 3.5) dificultando la detección del contorno pupilar. Para evitar esta situación, se delimita el contorno del destello seleccionando los píxeles saturados que están conectados. Si el área que obtenemos con este procedimiento interfiere con el contorno de la pupila, estos datos se eliminan para poder ajustar a una elipse. El porcentaje de datos que se eliminan del contorno

pupilar es muy pequeño y no interfiere a la hora de obtener un buen ajuste de la pupila.

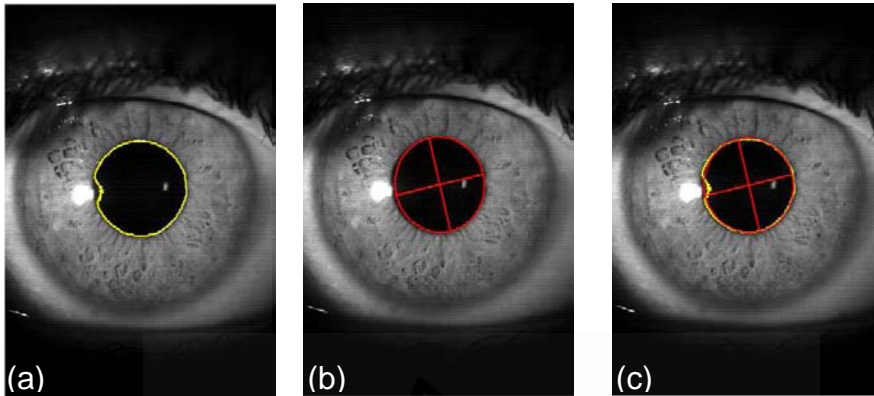


Figura 3.5 (a) Imagen del contorno pupilar en presencia del reflejo del sistema de iluminación (b) ajuste del contorno pupilar (c) imagen representativa del contorno pupilar (amarillo) y su ajuste (rojo).

Las coordenadas (x,y) de los píxeles que forman el contorno de la pupila se ajustan a una elipse y obtenemos sus parámetros característicos. El procedimiento para este ajuste se realiza en Matlab siguiendo el método de mínimos cuadrados al igual que en los puntos 2.1 y 3.1.

La correspondencia entre los píxeles y las distancias reales se obtienen capturando un patrón de tamaño conocido. De este modo, obtenemos una resolución de 40 px/mm siendo la precisión de la medida de 2,5 μm . Si consideramos que el centro de rotación del ojo está situado en torno a los 15 mm del ápex corneal [Fry, 1962], la resolución angular de la imagen es de 10,5 px/deg.

El estudio de los movimientos oculares se lleva a cabo mediante el seguimiento de las coordenadas del centro de la elipse (X_0, Y_0). Si la variación en ambos ejes de la elipse es equivalente, el desplazamiento del centro de la elipse no corresponderá por tanto a variaciones en su forma. Los parámetros resultantes del ajuste de la pupila a una elipse permiten evaluar la variación espontánea del diámetro pupilar bajo una iluminación constante o también llamada hippus [Bouma, 1971; Wyatt, 1995].

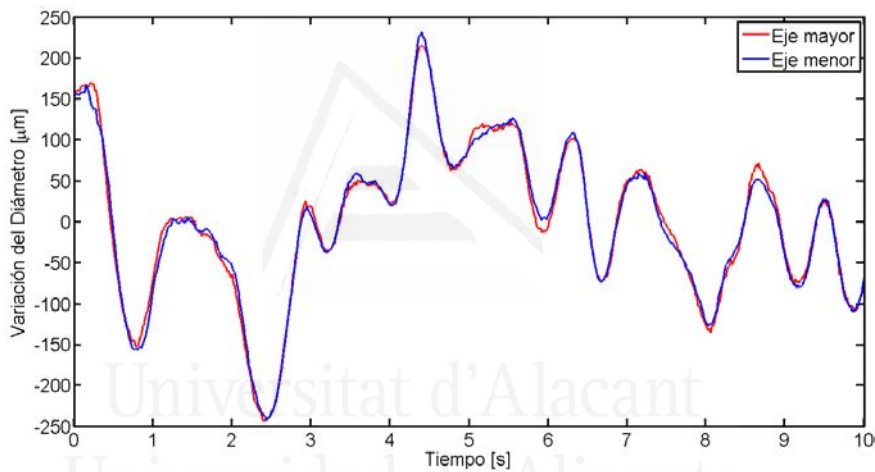


Figura 3.6 Variación del diámetro pupilar para el sujeto AR.

En la figura 3.6, podemos ver la variación de los ejes mayor y menor de la elipse respecto a sus valores medios para un observador típico. La coincidencia de los dos ejes nos indica que no existe una deformación asimétrica de la pupila durante esta variación espontánea. De dicha gráfica podemos deducir que la pupila mantiene su forma a través del tiempo y teniendo en cuenta, que la distancia de acomodación es fija, podemos asumir

que el desplazamiento registrado es debido a los movimientos oculares.

La manera más clara de apreciar la estructura del movimiento del ojo es representar por separado los movimientos horizontales y los verticales, tal y como se muestra en la figura 3.7. Los microsacádicos se pueden identificar fácilmente como saltos repentinos. Su amplitud varía entre 1 min arco y 1° . En nuestro caso, calculamos aproximadamente un valor medio de unos 30 min arco. En algunas de las medidas realizadas para algunos sujetos aparecen picos de más de 5° que probablemente representen movimientos sacádicos producidos por la pérdida de fijación. Las derivas se pueden identificar como variaciones de baja frecuencia en la posición del ojo. En ocasiones, variaciones finas de la posición del ojo en torno a las derivas pueden ser debidas a los trémores. Como nuestro sistema muestrea a 63 fps, los movimientos por encima de 32 Hz no se podrán registrar correctamente. Con esta velocidad estamos al límite de la detección de los movimientos rápidos del ojo, pero se justifica su elección, ya que de esta manera, obtenemos mayor cantidad de luz en las secuencias registradas, lo que facilita el procesado y el análisis de los fotogramas.

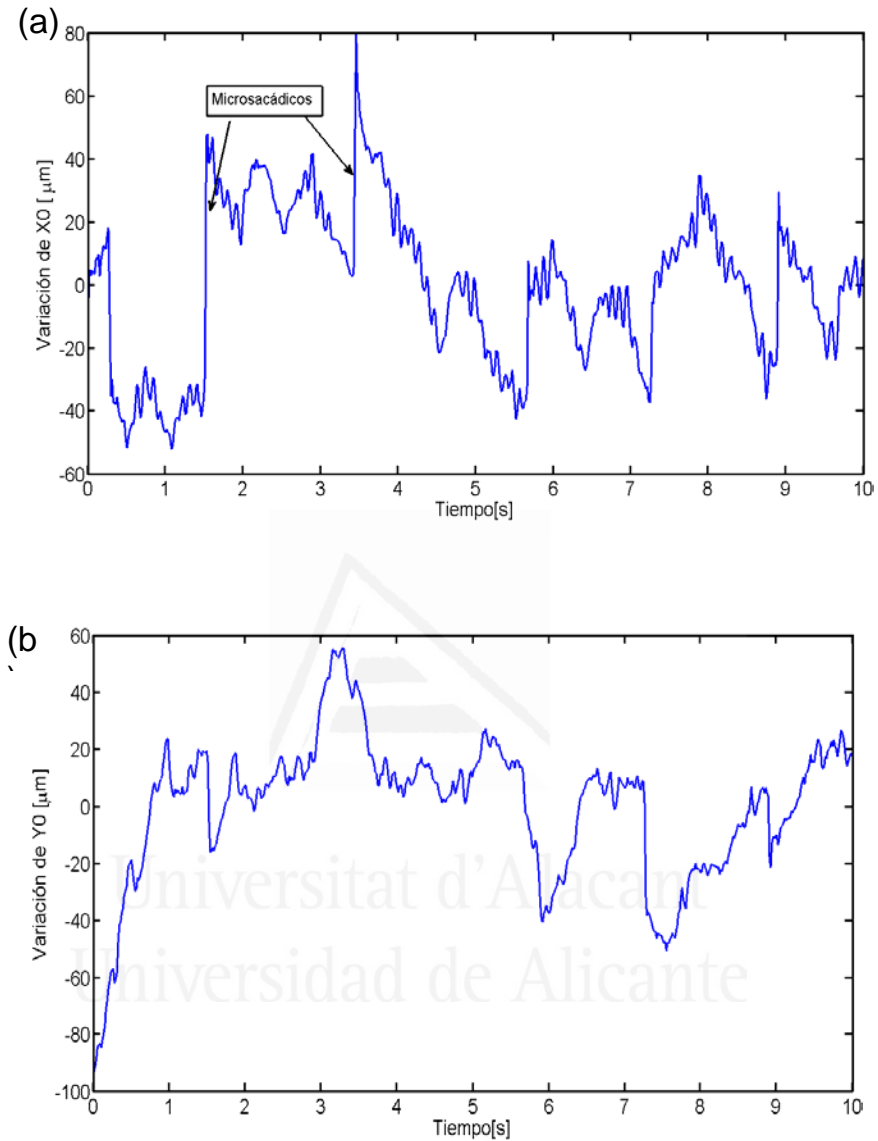


Figura 3.7 (a) Representación de la componente horizontal para el sujeto AR donde se pueden observar claramente los microsacádicos. (b) representación de la componente vertical para el mismo sujeto.

Otro de los parámetros que podemos analizar tras el ajuste del contorno pupilar, es la excentricidad de la elipse (figura 3.8). En la tabla 3.1, se muestra la excentricidad obtenida para todos los sujetos, junto con la variación del área. Como se puede apreciar, la variación del área de la pupila debida al hippus está en torno al 5% mientras que la variación de la excentricidad está alrededor del 8%. Los resultados obtenidos para la variación del área están en consonancia con los encontrados en la bibliografía [Li, 2009] los cuales muestran una variación del 3%. Aunque se asume que la pupila presenta una forma elíptica [De Santis, 2006], no se ha encontrado información sobre la variación de la excentricidad, porque la mayoría de los pupilómetros utilizados en oftalmología asumen que la pupila es circular para un sujeto sano.

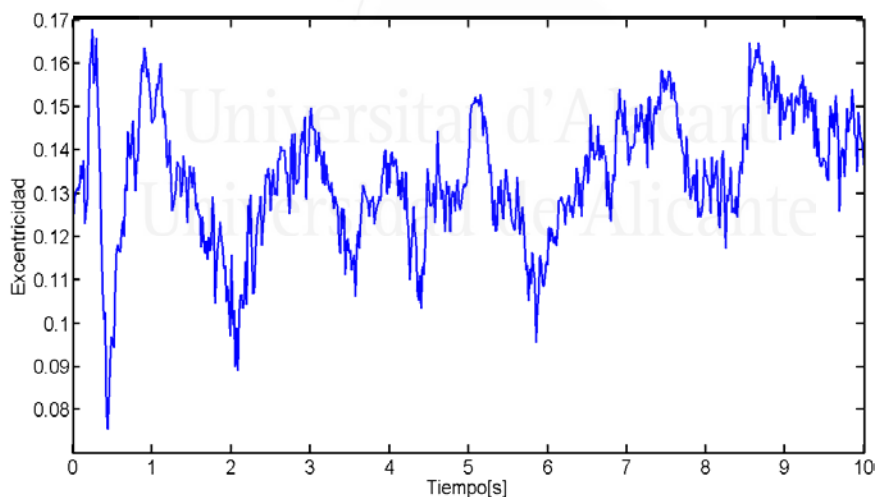


Figura 3.8 Excentricidad de la elipse para el mismo sujeto (sujeto AR).

Sujeto	Área (mm²)	Excentricidad
AR	18,55 ± 1,18	0,14 ± 0,01
MM	8,70 ± 0,47	0,20 ± 0,02
JE	12,13 ± 0,49	0,27 ± 0,01
DM	10,58 ± 0,11	0,23 ± 0,03
BD	8,04 ± 0,37	0,24 ± 0,01

Tabla 3.1 Área pupilar y excentricidad obtenidas para todos los sujetos.

El valor específico de la orientación de la elipse, que puede ser obtenido mediante la expresión (A1.14) no es un parámetro importante, pero su variación es la que nos proporciona información sobre las ciclorsiones del ojo. En la figura 3.9, se muestra este parámetro para otro de los sujetos. En la tabla 3.2, se ven los valores medios y su desviación estándar. Si consideramos la desviación estándar como una medida de la variación, podemos ver que los valores varían mucho entre sujetos. En la bibliografía se han encontrado valores en torno a los 2° [Porter, 2005] aunque se han observado ciclorsiones de 9,5° durante las intervenciones quirúrgicas [Chernyak, 2004]. Para algunos observadores, los valores son cercanos a los consultados en la bibliografía, mientras que para otros son elevados.

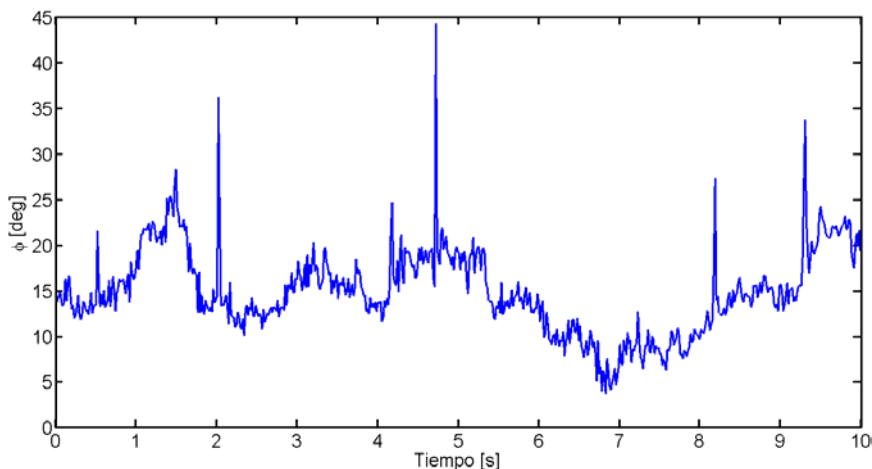


Figura 3.9 Representación de la orientación de la elipse para el sujeto MM.

Sujeto	Ángulo (°)
AR	-11,752 ± 14,068
MM	9,604 ± 7,904
JE	2,983 ± 21,031
DM	-0,507 ± 3,646
BD	-9,760 ± 3,194

Tabla 3.2 Oscilación angular para todos los sujetos.

Por tanto, podemos concluir que con el método aquí desarrollado se han obtenido buenos resultados en el análisis de los diferentes parámetros geométricos de la elipse, aunque estos resultados dependen mucho de la precisión en la determinación dichos parámetros. Los errores en esta determinación pueden distorsionar los resultados para medidas indirectas como en el

caso de la medición del ángulo. Otra fuente de error puede venir de la pérdida de fijación por parte del sujeto, que puede provocar un ajuste de la vergencia binocular y por tanto modificar el ángulo de la elipse.

3.2.2 Análisis del reflejo pupilar a la luz

Como parte del estudio de la dinámica ocular, además de estudiar los movimientos oculares de fijación, analizaremos el reflejo pupilar a la luz. Este reflejo caracteriza la respuesta del ojo a la luminosidad percibida de un estímulo. Se pueden definir dos tipos de reflejo pupilar: directo y consensual cuya diferencia está en el estímulo. Hablamos de respuesta directa si la pupila que recibe la luz se contrae, mientras que si la pupila que se contrae es la opuesta a la que recibe la luz se llama consensual. Las respuestas tanto consensual como directa en humanos se han considerado iguales en condiciones normales [Lowenstein, 1942; Lowenstein, 1954], de modo que una respuesta desigual se atribuye a patologías neurológicas. Sin embargo, algunos estudios han encontrado que la amplitud de la respuesta consensual es menor que la respuesta directa [Smith, 1979; Wyatt, 1981].

El sistema parasimpático [Barbur, 2004] controla el músculo esfínter del iris responsable de la contracción de la pupila (miosis) y por tanto el reflejo pupilar podría estar vinculado con la

activación del área del mesencéfalo involucrada en la dirección de las respuestas y en los movimientos sacádicos, conocida como Colliculus Superior [Robinson, 1975; Wang, 2012; Mathôt, 2013]. Los sacádicos son los movimientos más rápidos producidos por el cuerpo humano, con picos de 900°/s. Se producen durante parte del proceso normal de la visión en tan sólo 120 ms [Kirchner, 2006], o como reacción a un estímulo inesperado. En este último caso, la respuesta puede ser de hasta 90 ms y durar entre 20-200 ms [Hamm, 2010]. Sin embargo, hasta ahora, el reflejo pupilar registrado empieza en torno a 200 ms [Fotiu, 2000; Ferrari, 2010]. Si estos reflejos son activados por el mismo sistema, se puede esperar que sean igual de rápidos. Además, estudios recientes [Laeng, 2012; Binda, 2013; Naber, 2013; Laeng, 2014] han mostrado que el reflejo pupilar es más sensible al brillo percibido que al real. Estos resultados llevan a considerar que el reflejo pupilar no es simplemente una respuesta refleja a la iluminación que llega a la retina, junto con los movimientos del ojo, puede estar relacionado con el incremento de la agudeza visual y la sensibilidad al contraste.

Para el análisis directo de la reacción pupilar, normalmente, se utilizan técnicas de vídeo-oculografía. La evaluación del reflejo pupilar a la luz implica el registro de manera no invasiva de la variación del tamaño de la pupila en función del tiempo. Las técnicas que se emplean para obtener el reflejo pupilar utilizan luz infrarroja para iluminar la pupila y cámaras de vídeo que trabajan entre 30 y 60 fps para registrar la actividad de la misma. Durante la

grabación se dispara un flash y se obtiene el reflejo pupilar. Por último, se analiza la secuencia para obtener los parámetros que definen el reflejo pupilar como son el tiempo de latencia para la contracción, la duración y velocidad de contracción, la relación radio pupila/iris en oscuridad [Fotiou, 2000; Ferrari, 2010]. Actualmente dichas técnicas, emplean cámaras con una resolución temporal de 15 ms (60 fps). La mayoría de estos estudios fueron realizados hace algunos años, cuando muchas de las herramientas o dispositivos actuales no eran asequibles.

Por este motivo, partiendo del sistema de medida desarrollado para la detección de los movimientos oculares de fijación, lo llevamos más allá para desarrollar un método que nos permita analizar el reflejo pupilar en once sujetos realizando las medidas simultáneamente en ambos ojos, en lugar de realizarlas de manera monocular como se suele hacer en los estudios de la dinámica ocular. Realizando las medidas simultáneamente, podemos estudiar y comparar que sucede en ambos ojos durante el mismo instante de tiempo y en las mismas condiciones.

El dispositivo utilizado en este experimento tal y como se muestra en la figura 3.10, consta de un proyector halógeno que proporciona una iluminación uniforme para ambos ojos, una pantalla separadora opaca que nos permite estimular únicamente uno de los ojos, dos cámaras de alta velocidad (AOS Technologies AC) sincronizadas entre sí y por último dos unidades flash. Además, a los sujetos se les indica que mantengan su mirada fija

en un punto lejano, para minimizar los movimientos oculares y también la contracción pupilar por efecto de la acomodación y la convergencia.

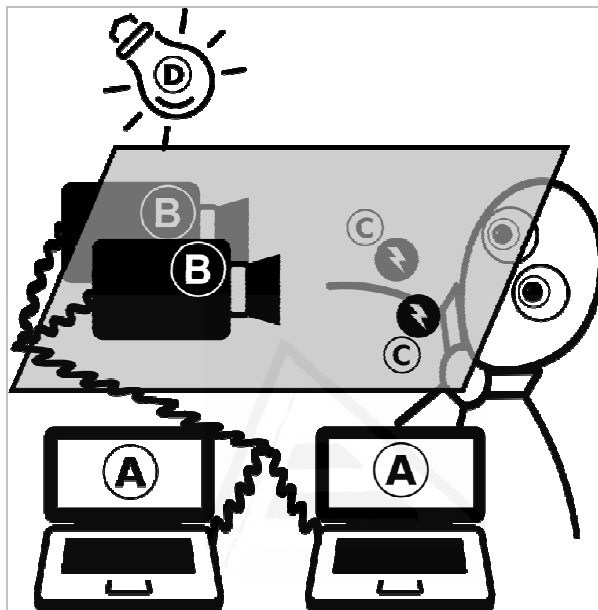


Figura 3.10 Esquema del montaje experimental. A) Ordenadores B) Cámaras C) Unidades flash D) Proyector halógeno.

Las cámaras están situadas a 34 cm de los ojos del sujeto y registran secuencias a una velocidad de 500 fps con una resolución espacial de 800 x 600 px. Cada una de ellas se enfoca a uno de los ojos del sujeto y además están conectadas a un ordenador diferente, el cual almacenará la secuencia procedente de la cámara conectada al mismo. La iluminación ambiente es de 2170 ± 50 lux. Cada unidad flash se orienta hacia uno de los ojos de manera que sólo ilumina dicho ojo.

Se registra una secuencia, para cada uno de los ojos del sujeto, que tiene una duración de 4,20 s. El procedimiento a seguir para obtener las secuencias es muy sencillo, después del primer segundo de grabación, se dispara el flash el cual ilumina uno de los ojos y se registra la secuencia para ambos ojos hasta el final del tiempo establecido. En el instante en que el flash se dispara, la iluminación alcanza 4100 ± 200 lux. Estos mismos pasos se repiten para obtener la secuencia del otro ojo.

Es este caso, el objetivo de nuevo es aprovechar la forma particular que presenta la pupila para determinar su contorno y sus parámetros por medio del ajuste del mismo. Los fotogramas obtenidos a partir de las secuencias registradas, están en escala de grises de 8 bits y se presentan degradados debido a la presencia de ruido (figura 3.11(a)). La falta de luz en los fotogramas obtenidos es debido al aumento de la velocidad de las cámaras respecto al experimento anterior. En este caso, se le da prioridad a la velocidad para asegurar la detección del reflejo pupilar aunque ello implique una pérdida de luz en los fotogramas obtenidos.

Para eliminar dicho ruido de las imágenes y facilitar la obtención del contorno de la pupila, se aplica el filtro adaptativo de Wiener [Mathworks, A], el cual se basa en una estadística estimada a partir de un entorno local de cada píxel con un tamaño de 9×9 px, para obtener la media de la imagen local y su desviación estándar. El resultado de aplicar este filtro lo podemos ver en la figura

3.11(b).

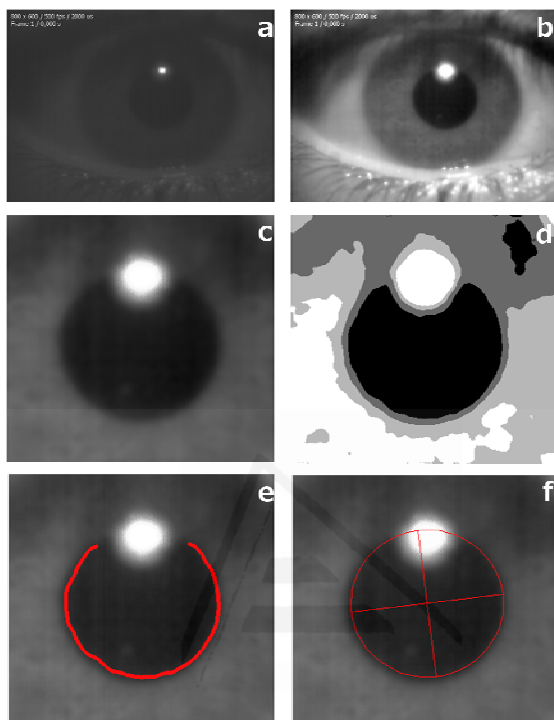


Figura 3.11 Diferentes fases del procesado de la imagen.

El siguiente paso consiste en la selección de la región de interés, que vuelve a ser la pupila (figura 3.11(c)). Para ello, es necesario mejorar el contraste de la imagen filtrada limitando el rango de niveles de gris. Partiendo de la figura 3.11(c), se ha llegado a la conclusión que 4 niveles de gris son suficientes para obtener, claramente diferenciadas del resto de la imagen, las áreas del reflejo y de la pupila. La imagen resultante se puede ver en la figura 3.11(d).

A continuación, se definen dos máscaras con el objetivo de delimitar y definir dos regiones de la imagen, la pupila y el reflejo del sistema de iluminación. La primera de dichas máscaras (M1) incluye los píxeles con intensidad nula, entre los que se encuentran los pertenecientes a la región pupilar. Como ocurría en el experimento anterior, el reflejo del sistema de iluminación puede interferir en la extracción del contorno pupilar, por lo que puede no ser útil aplicar directamente una función de extracción de bordes. Por este motivo, se define la segunda máscara (M2), que consiste en obtener todos los píxeles de intensidad por debajo de $\frac{3}{4}$ de la máxima (255). Después, se incrementa el área afectada por el reflejo aplicando a M2 un operador morfológico de erosión, descrito en la expresión A2.1 del anexo 2. Finalmente, seleccionamos sólo los píxeles que coinciden con el borde de M1.

Para finalizar, procedemos de la misma manera que en el experimento anterior, obteniendo el contorno de la pupila (figura 3.11(e)) y ajustando las coordenadas de los píxeles que forman dicho contorno a la ecuación general de una elipse según (A1.1) (figura 3.11(f)).

El procedimiento realizado se debe aplicar a cada fotograma de la secuencia, por lo que la selección del área de interés, es un punto crítico del mismo. La selección de dicha región de interés se lleva a cabo para aumentar la velocidad en el procesado de las imágenes, ya que se trabaja con un número de fotogramas mayor que en el experimento anterior, y por tanto, la reducción de la

región favorece que el procesado sea más rápido. Además, la selección de la región debe ser dinámica para evitar que la pupila se salga del área seleccionada, por eso, el área de interés se centra cada vez en las coordenadas del centro de la pupila del fotograma anterior. De esta manera podemos decir que el área de interés sigue a la pupila cancelando movimientos. Hay que tener en cuenta que además del movimiento del ojo, en el montaje no hay ningún sistema de sujeción de la cabeza para evitar los movimientos involuntarios de la misma que podrían ser detectados y asignados a los ojos. Teniendo en cuenta que el sistema trabaja a 500 fps con una resolución de 24 px/mm la técnica cancela movimientos más lentos de 21 mm/s.

Una vez se obtienen los parámetros que definen la elipse, se analiza el tamaño de la pupila, teniendo en cuenta la longitud de los dos ejes de la elipse. Nuestro interés radica ahora en estudiar la contracción de la pupila, y tal y como se ha comprobado en el experimento anterior, la variación de la longitud de los ejes de la pupila es la misma, indicando que la pupila no sufre una deformación asimétrica (figura 3.6). Por tanto, podemos considerar que dicha contracción se producirá de igual manera en ambos ejes. En general, la diferencia relativa entre ellos es de un 2%, por este motivo es posible asumir que la pupila presenta una forma circular y su radio está definido como la media de ambos ejes. Siguiendo los parámetros definidos en otros estudios [Fotiou, 2000; Ferrari, 2010] se estudia la evolución temporal del radio pupilar. Los principales parámetros que se definen son: el tiempo

de latencia desde que se produce la exposición al flash al inicio de la contracción (T_1), el cual está localizado en el valor mínimo para la segunda derivada del radio [Bergamin, 2003; Fan, 2011], el tiempo de latencia para el tamaño mínimo de la pupila (T_2) y la latencia de estabilización (T_3). Este último parámetro, se encuentra en el punto donde finaliza el proceso de la contracción. En nuestro caso, se define este punto como el instante perteneciente al intervalo de tiempo posterior a T_2 en el cual la segunda derivada presenta un mínimo absoluto.

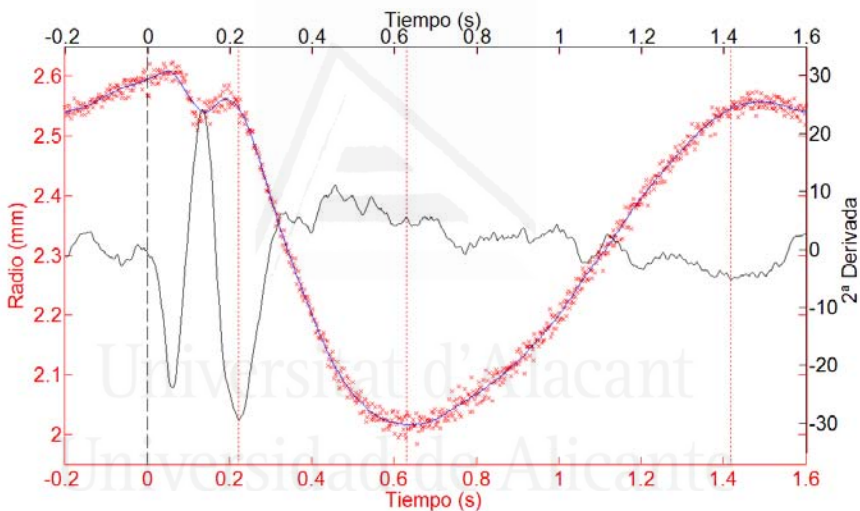


Figura 3.12 Variación en el tiempo del radio pupilar (cruces rojas y línea azul) y su segunda derivada (línea negra) después de disparar el flash ($t=0$ s). Líneas rojas verticales consecutivas representan T_1 , T_2 y T_3 .

En la figura 3.12, se muestra un ejemplo del reflejo pupilar para un ojo real. En esta figura se representa la evolución del radio pupilar (cruces) con el tiempo, donde el tiempo es cero en el instante que se dispara el flash. La línea continua (azul) representa el radio tras

aplicar el filtro Savitzky-Golay. La línea de color negro representa la segunda derivada del radio, calculada a partir de los datos filtrados. Las líneas verticales representadas en la figura corresponden al T_1 , T_2 y T_3 respectivamente.

En la tabla 3.3 se muestran los valores medios obtenidos, teniendo en cuenta los resultados de once sujetos. La estadística se ha realizado considerando todo el conjunto de ojos, diferenciando entre reflejo directo y consensual y entre ojo dominante y ojo no dominante. El interés en estudiar la diferencia entre las respuestas del ojo dominante y no dominante, radica en conocer si existe influencia de la dominancia ocular en cuanto al tiempo de respuesta ante un estímulo luminoso. La determinación del ojo dominante se ha llevado a cabo realizando el siguiente test. El sujeto, estira sus brazos hacia delante, hasta que sus manos están a una distancia de 45-50 cm. Después, debe juntar los dedos índice y pulgar de ambas manos, formando una abertura entre ellas. A través de dicha abertura debe enfocar un objeto pequeño con los dos ojos abiertos. A continuación, cerrando alternativamente los ojos, debe percatarse de con que ojo observa el objeto a través de la abertura. El ojo con el que observe el objeto será su ojo dominante [Pons, 2004].

Como vemos en la tabla, y al igual que los resultados encontrados en la bibliografía [Lowenstein, 1942; Lowenstein, 1954], no hay diferencia significativa entre los tiempos del reflejo pupilar directo y el reflejo pupilar consensual, ya que se ha obtenido un p-valor

menor de 0,05. De igual manera, no se ha encontrado diferencias significativas entre los tiempos del ojo dominante y no dominante.

	Todos	Reflejo pupilar		Ojo	
		Directo (s)	Consensual (s)	Dominante (s)	No-dominante (s)
T ₁	0,206±0,027	0,205±0,026	0,207±0,027	0,206±0,027	0,202±0,027
T ₂	0,632±0,087	0,641±0,081	0,623±0,092	0,623±0,087	0,628±0,088
T ₃	1,335±0,206	1,234±0,200	1,347±0,216	1,337±0,191	1,338±0,251

Tabla 3.3 Parámetros temporales del reflejo pupilar después de un estímulo luminoso. Los datos están agrupados distinguiendo entre reflejo directo y consensual, y entre ojo dominante y no dominante.

En la tabla 3.4, se comparan los resultados para el parámetro de tiempo T₁ obtenidos con el método propuesto con los resultados encontrados en la bibliografía [Fotiou, 2000; Ferrari, 2010], y se puede ver que coinciden. Sin embargo T₂ es similar a los obtenidos en [Fotiou, 2000] pero no en [Ferrari, 2010] y T₃ no coincide con ninguno. Estas diferencias se pueden deber a la diferente manera de definir los parámetros o a las características en cuanto a diseño y realización del experimento. Por ejemplo, en nuestro caso medimos bajo condiciones fotópicas y por tanto el diámetro pupilar inicial es más pequeño y puede afectar a la duración de la contracción. Esto puede ser un motivo por el que nuestro valor de T₃ es más bajo que los valores de la bibliografía.

Además, otra de las posibles causas que ha podido contribuir a esa diferencia en los resultados es que el flash no presenta las mismas características, como son la intensidad o el tiempo de exposición.

	Fotiou,2000	Ferrari,2010	Método Propuesto
T_1 (s)	0,17±0,03	0,20±0,078	0,206 ± 0,027
T_2 (s)	0,64±0,07	0,90±0,147	0,632 ± 0,087
T_3 (s)	1,86±0,24	1,63±0,559	1,335 ± 0,206

Tabla 3.4 Comparación entre los resultados obtenidos con el método propuesto y los resultados encontrados en la bibliografía.

Si nos fijamos de nuevo en la figura 3.12, y nos centramos en el intervalo de tiempo entre 0 y T_1 , podemos ver un primer pico negativo en la segunda derivada previo al comienzo de la contracción. Para poder observarlo mejor, en la figura 3.13 se representa esta región previa a T_1 ampliada. Teniendo en cuenta que la amplitud del pico es del orden del que señala el comienzo del reflejo pupilar, no puede ser considerado como ruido experimental. Nuestra hipótesis es que podría indicar el inicio de una contracción temprana. Por otra parte, el radio disminuye aproximadamente 100 μm después de este tiempo, aunque recupera rápidamente el estado inicial. Por tanto, hemos definido nuevos parámetros de tiempo, de manera similar a los que describen el reflejo pupilar, que caracterizan esta contracción temprana. El instante en el que se produce un primer mínimo local en la segunda derivada lo denotaremos por τ_1 . Si nos fijamos en la

variación en el tiempo del radio después de τ_1 , podemos suponer una trayectoria similar a la del reflejo pupilar que empieza en τ_1 , alcanza un radio mínimo relativo para τ_2 y debería terminar estabilizándose. Sin embargo, dicha estabilización generalmente no se define ya que se superpone con el comienzo del reflejo pupilar.

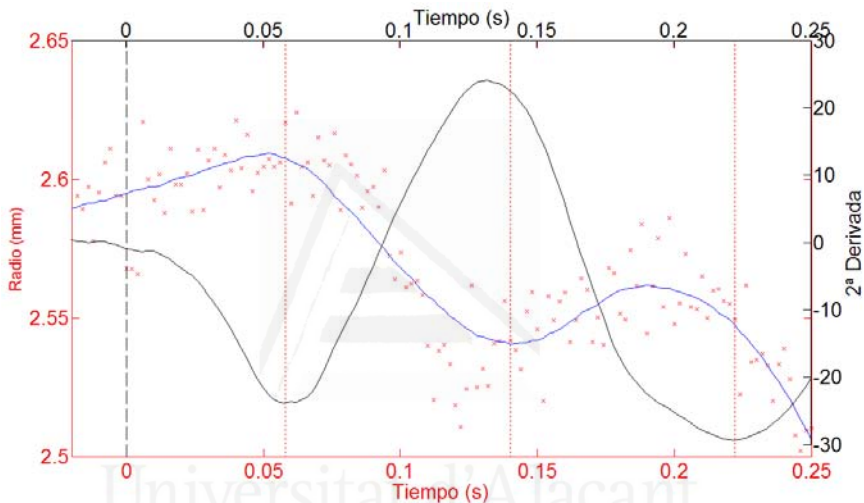


Figura 3.13 Variación en el tiempo del radio pupilar (cruces rojas y línea azul) y su segunda derivada (línea negra) después de disparar el flash ($t=0$ s). Líneas rojas verticales consecutivas representan τ_1 , τ_2 y τ_1 .

Hasta donde sabemos, es la primera vez que se ha detectado y analizado esta contracción temprana. En la tabla 3.5, se muestran los resultados medios obtenidos para τ_1 y τ_2 , considerando todos los ojos en su conjunto y distinguiendo entre reflejo directo y consensual y entre ojo dominante y no dominante. En este caso, tampoco se han encontrado diferencias significativas, ya que se ha obtenido un p-valor menor de 0,05.

	Todos	Reflejo pupilar		Ojo	
		Directo (s)	Consensual (s)	Dominante (s)	No-dominante (s)
τ_1	0,050±0,017	0,047±0,017	0,052±0,017	0,046±0,016	0,051±0,016
τ_2	0,110±0,034	0,105±0,032	0,114±0,035	0,108±0,033	0,113±0,014

Tabla 3.5 Parámetros temporales para el reflejo pupilar temprano después de disparar el flash. Agrupamos los datos distinguiendo entre reflejo directo y consensual, y entre ojo dominante y ojo no dominante.

Para descartar, que esta reacción temprana del reflejo pupilar se debe a un efecto del método, se han realizado medidas con un ojo artificial con una pupila de 5 mm de diámetro evaluando la existencia de algún artefacto debido a la cámara. Con este experimento, se obtiene la resolución espacial del método, tomando tres veces la desviación estándar de los datos y para la cual se obtiene un resultado de 3 μm . En la figura 3.14, al igual que en el caso del reflejo pupilar de un ojo real, con cruces rojas se representa el radio pupilar detectado para el ojo teórico. Aplicando el filtro Savitzky-Golay se elimina el ruido sal y pimienta [Fan, 2011] obteniendo la línea azul que se puede observar en la gráfica. La línea verde representa la segunda derivada obtenida a partir de los datos filtrados del radio. El instante en el que se dispara el flash se establece como $t = 0$ s. Hay que tener en cuenta que el rango de variación de la segunda derivada es pequeño, entre -0,01 y 0,01 mm/s^2 , y los picos son insignificantes en comparación con las que aparecen en la figura 3.12 para el

reflejo pupilar de un ojo real.

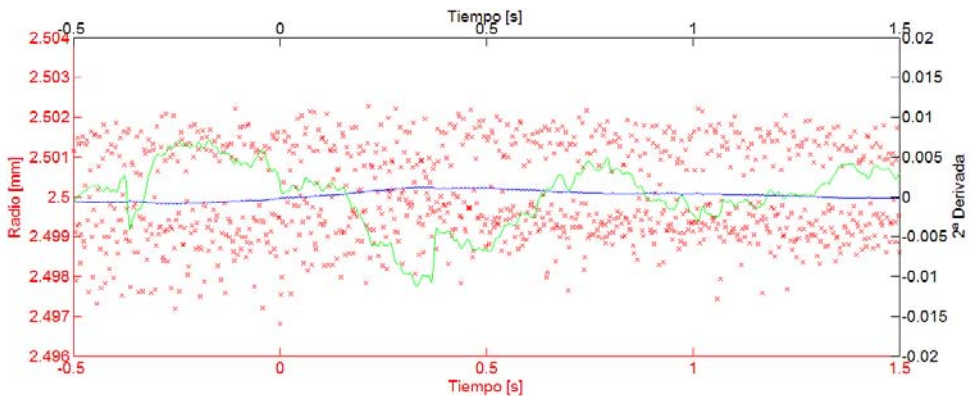


Figura 3.14 Variación en el tiempo del radio pupilar y su segunda derivada para el ojo artificial. Las cruces rojas y la línea azul representan al radio pupilar. En verde se puede ver la segunda derivada.

Tras realizar las medidas del ojo teórico y asegurar que este fenómeno, que aparece en ambos ojos para todos los observadores, no se debe a un efecto del método podemos plantear nuestra hipótesis respecto a este fenómeno. Teniendo en cuenta que el tiempo de reacción de esta contracción temprana es 0,05 s, sienta del orden del tiempo de reacción de un sacádico 90 ms [Hamm, 2010], es posible que esta contracción temprana y el movimiento sacádico estén relacionados y que su origen sea el mismo, estando vinculados en la activación del colículo superior [Robinson, 1972; Wang, 2012; Mathôt, 2013]. Obviamente, es necesario realizar más experimentos que impliquen electroencefalografía y electro-miografía para confirmar los hallazgos y explicar adecuadamente el fenómeno que aquí se ha encontrado.

3.2.3 Calibración de un topógrafo corneal

Para estudiar los cambios dinámicos de la superficie corneal, así como la calidad de la película lagrimal se utilizan los llamados topógrafos corneales. Como sabemos, la córnea no es una superficie esférica y por tanto los anillos del topógrafo proyectados en ella no son completamente circulares ni concéntricos. Debido a que la imagen de los anillos de Plácido sobre la córnea se aproxima a una elipse, se propone aplicar el algoritmo de detección de la elipse para la obtención y ajuste de dichos anillos.

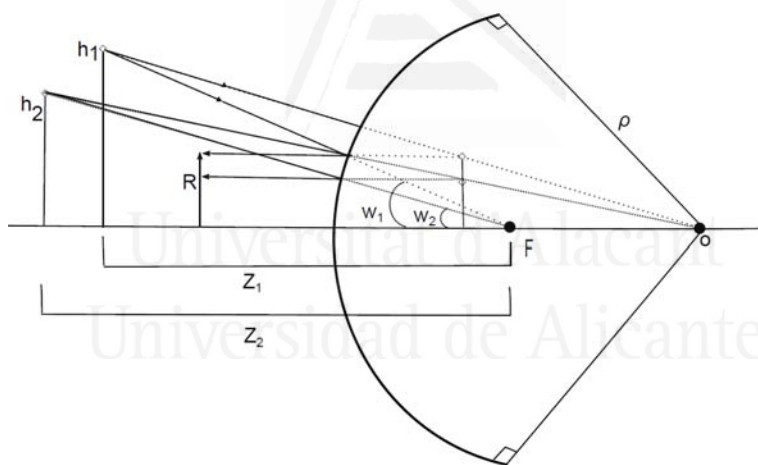


Figura 3.15 Trazado de rayos que describe el principio queratométrico.

El reflejo del anillo de Plácido en la superficie corneal (figura 3.15), se puede describir mediante el principio queratométrico como:

$$R = \frac{\rho h}{2Z} \quad (3.1)$$

donde h es el radio del anillo de Plácido, ρ es el radio de la superficie, R es la distancia radial y z es la distancia desde el anillo al foco de la superficie corneal, la cual se puede modelar como un espejo convexo.

Muchos topógrafos permiten realizar una grabación continua del ojo lo que posibilita la observación y análisis de cambios dinámicos de la córnea [Goto, 2003; Iskander, 2004]. Sin embargo, ninguno de los dispositivos disponibles permite un control total de la cámara y de los algoritmos de procesado. En todos los casos, la información de cómo se ha obtenido la topografía corneal está oculta y fuera del alcance de los investigadores, a pesar de su interés. En ocasiones, incluso cuando es posible exportar los datos obtenidos por el topógrafo ya procesados, los algoritmos y las especificaciones del sistema no están disponibles.

Debido a estas limitaciones, existen trabajos [Serra, 1983; De Carvalho, 2002; Mas, 2010] que intentan mejorar los algoritmos de los topógrafos para evitar dichas restricciones. Un inconveniente de los métodos desarrollados en estos trabajos es la conversión de coordenadas cartesianas a coordenadas polares de la imagen. En este tipo de conversión es importante el conocimiento de la posición del centro de los anillos, con el objetivo de facilitar el procesado de la imagen. Sin embargo, el hecho de que los anillos reflejados en córnea no sean necesariamente concéntricos produce que en la imagen en coordenadas polares de los anillos aparezcan líneas onduladas. Este inconveniente, dificulta el

procesado de la imagen y el ajuste de los anillos.

Con la aplicación del algoritmo de detección de una elipse se pretende obtener una superficie de calibración del topógrafo considerando la información procedente de cada anillo de Plácido. Dicha información se obtiene de la imagen de los anillos reflejados en unas esferas de metal pulidas de radio conocido (figura 3.16(a)) las cuales se miden con un topógrafo corneal Medmont E-300.

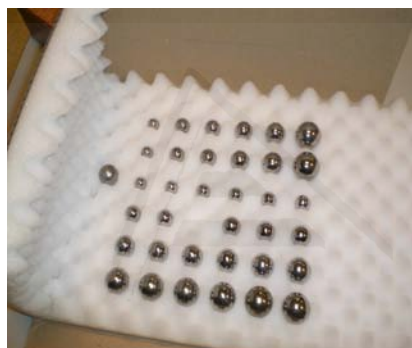


Figura 3.16 Esferas de acero de radio conocido.

El proceso de obtención de dicha superficie se puede dividir en dos fases: extracción y clasificación de los anillos reflejados, y la calibración de la imagen.

En la primera fase, para extraer y clasificar los anillos reflejados en una superficie es necesario mejorar el contraste de las imágenes que se obtienen en escala de grises. Para ello, se aplican por separado los filtros “*opening top-hat*” (A2.5) y “*closing top-hat*” (A2.6) a la imagen inicial utilizando un elemento estructural en

forma de disco de radio 5 px y se restan las imágenes resultantes (figura 3.17(a)).

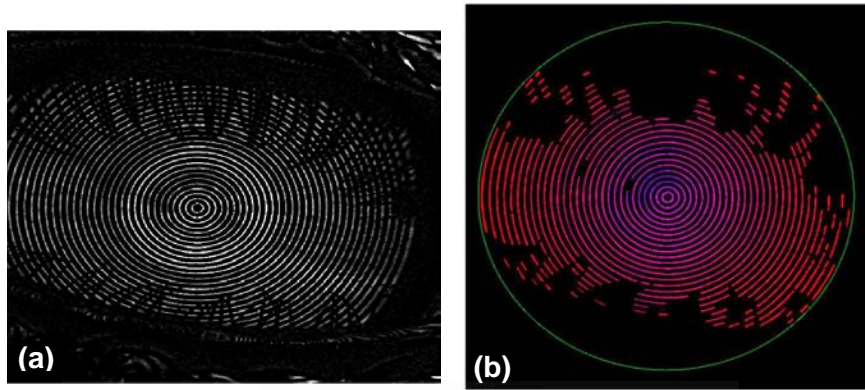


Figura 3.17 (a) Diferencia entre los fotogramas filtrados con “opening Top-Hat” y “closing Top-Hat”. (b) Fotograma final extraído del vídeo del etiquetado de los anillos proyectados a través del anillo de barrido.

A continuación, se realiza un barrido para clasificar los anillos, que empieza desde el centro de la topografía definiendo un anillo de radio 1 px (figura 3.17(b)). Este anillo va creciendo píxel a píxel hasta que detecta un píxel diferente de cero. El anillo detectado es etiquetado en función de su posición respecto del centro. Los píxeles que forman el anillo detectado son ajustados a una elipse, de manera que se obtienen sus parámetros geométricos (coordenadas del centro, longitud de los ejes y su inclinación). Estos parámetros se usan para implementar el siguiente anillo de barrido que continúa detectando más anillos. El proceso se repite hasta que el algoritmo es incapaz de discernir un único anillo.

En la segunda fase se procede al calibrado de la imagen. Para

ello, partiendo de los anillos etiquetados, se calcula punto a punto el mapa de curvatura de la córnea. Este método ha sido descrito por algunos autores como “look-up table” o “algoritmo de esferas calibradas” [De Carvalho, 2002; Roberts, 1994; Klein, 2000]. En trabajos anteriores [Mas, 2010(B)], se ha obtenido un conjunto de curvas de calibración utilizando 18 esferas de acero, de radio de curvatura conocido con una precisión de 10 μm , que describen cada uno de los anillos reflejados. El radio de curvatura de la superficie de calibración, ρ , para cada anillo etiquetado, i , está relacionado con la distancia radial media, R :

$$R = m_i \rho + n_i \quad (3.2)$$

donde $i=1,\dots,l$ representa el anillo etiquetado, y l es el número máximo de anillos detectados. La distancia radial media se calcula como la media de las distancias obtenidas después de transformar la imagen de coordenadas cartesianas a coordenadas polares.

El objetivo aquí, es obtener una superficie de calibración con una única ecuación de calibrado que dependa de ρ y de i como alternativa al conjunto de curvas de calibración obtenidas según la ecuación (3.2). Para ello, se aplica el algoritmo de barrido elíptico para detectar, unir y etiquetar los píxeles pertenecientes a cada uno de los anillos reflejados en la superficie de 12 esferas, cuyo radio de curvatura es conocido, y está comprendido entre 7 y 10 mm.

A partir del radio de curvatura conocido y de los anillos reflejados, clasificados según el algoritmo descrito anteriormente, sólo es necesario conocer la distancia radial media. R representa al conjunto de radios obtenido a partir del ajuste a una elipse de cada uno de los anillos. Los parámetros m_i y n_i muestran una dependencia lineal con el etiquetado de los anillos, el cual se puede expresar como $m_i=p_i$ y $n_i=q_i$. Así, que si volvemos a la ecuación 3.2, podemos introducir la dependencia con i , y conseguimos la siguiente fórmula de calibración:

$$R = p_i \rho + q_i \rightarrow R = p_i \left(\rho + \frac{q}{p} \right) \rightarrow R = p_i (\rho + s) \quad (3.3)$$

que solamente es aplicable para el rango de operación de curvatura del topógrafo. Los coeficientes p y s se obtienen a partir del ajuste por mínimos cuadrados de los parámetros de calibrado a la ecuación 3.3. Por medio de la ecuación 3.4, podemos obtener el radio de curvatura $\rho(x,y)$ en cualquier punto (x,y) de un anillo reflejado de curvatura desconocida. Para eso, sólo tenemos que averiguar la distancia $R(x,y)$ desde este punto al centro del fotograma:

$$\rho(x, y) = \frac{R(x, y)}{p_{i(x, y)}} - s \quad (3.4)$$

En la figura 3.18, se representa la superficie de calibración obtenida que representa la relación entre el radio de curvatura, los anillos etiquetados y la distancia radial.

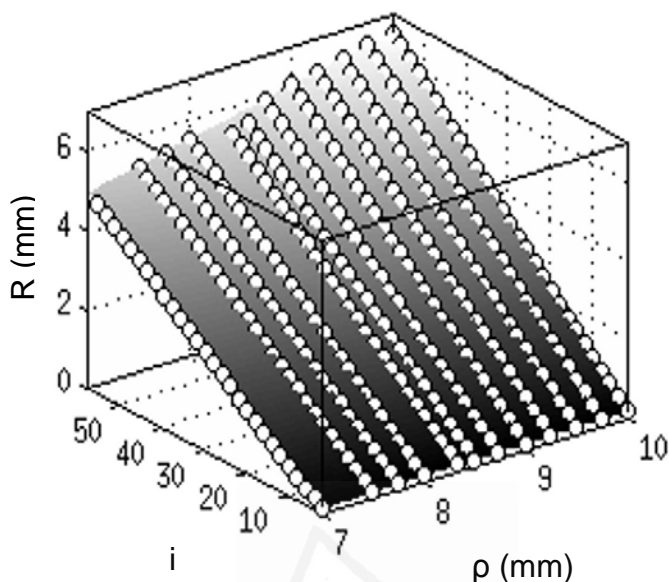


Figura 3.18 Superficie de calibración obtenida.

También, es posible considerar además de anillos, los bordes que forman dichos anillos ya que, de esta manera se incrementa la precisión en la medida de la superficie por el aumento de la densidad de muestreo. Este hecho implicaría obtener dos superficies de calibración, dependiendo de si consideráramos los anillos o bien los bordes. Para evitar esto, se pueden etiquetar a la vez los anillos y los bordes de manera que, los bordes se etiquetan mediante un número entero y los anillos con un número de orden más media unidad adicional. Aquí, se han procesado imágenes de la calibración de las esferas ajustándolas a la ecuación 3.3 por mínimos cuadrados, considerando los datos tanto para los bordes como para los anillos y para ambos.

	$\rho(\times 10^{-3})$	$\Delta\rho(\times 10^{-3})$	S (mm)	Δs (mm)	RMSE (mm)	R^2
Bordes	9,27	0,03	2,34	0,03	0,02	0,999
Anillos	9,31	0,03	2,30	0,04	0,02	0,999
Bordes y Anillos	9,28	0,02	2,32	0,03	0,02	0,999

Tabla 3.6 Parámetros de la calibración de la superficie obtenida para el ajuste a la ecuación 3.3.

En la tabla 3.6, se muestran los resultados obtenidos para un número de puntos de 596, 346 y 942 respectivamente. Se puede ver que los ajustes proporcionan parámetros similares, bajos errores cuadráticos medios (RMSE) y alta correlación entre variables.

Se ha comprobado la consistencia del método aplicando el algoritmo para medir el radio de curvatura de cada esfera en el proceso de calibración. Nuestro algoritmo proporciona entre 45000 y 59000 datos de curvatura muestreados en una matriz de 580 x 580. Esto implica un muestreo medio de 420 mm², el cual es 4 veces mejor que las resoluciones obtenidas en dispositivos comerciales típicos. Además, se han promediado los radios de curvatura obtenidos y comparado con los reales (figura 3.19). Los errores en el radio de curvatura medio están en torno a 0,07 mm. En la figura 3.19, se comparan las medias de los radios que nos proporciona el Medmont con los radios reales de las esferas. Ambas series de datos han sido ajustadas a la ecuación $C_{media} = aC_{real}$ mostrando una buena coincidencia, como se aprecia

en la tabla 3.7.

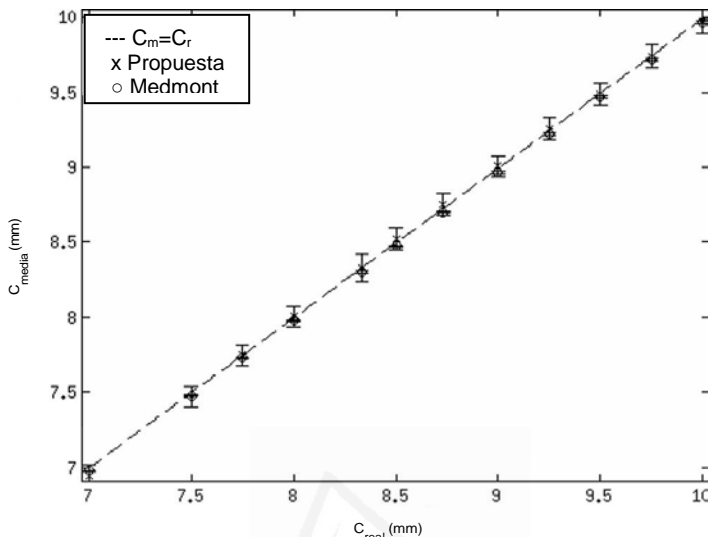


Figura 3.19 Radio de curvatura medio de la calibración de las esferas obtenido tanto para nuestro algoritmo como para el Medmont.

	a (mm ⁻¹)	Δa (mm ⁻¹)	RMSE (mm)	R²
Propuesta	0,99900	8e-4	6,00E-003	0,999
Medmont	0,99660	1e-5	1,00E-004	1

Tabla 3.7 Coeficientes de los parámetros del ajuste para comprobar la consistencia del método.

A fin de hacer más claras las diferencias entre ambas aproximaciones, hemos comparado los resultados de las medidas reales de la córnea. Los datos de curvatura del Medmont se muestran en la figura 3.20(a). Hay alrededor de 5000 puntos muestreados con una frecuencia espacial de 64 mm⁻². En la figura

3.20(b), representamos los datos obtenidos con nuestro método con 30113 puntos muestreados con una frecuencia espacial de 360 mm^{-2} . Nuestro método permite analizar alrededor de 6 veces más datos que el proporcionado por Medmont.

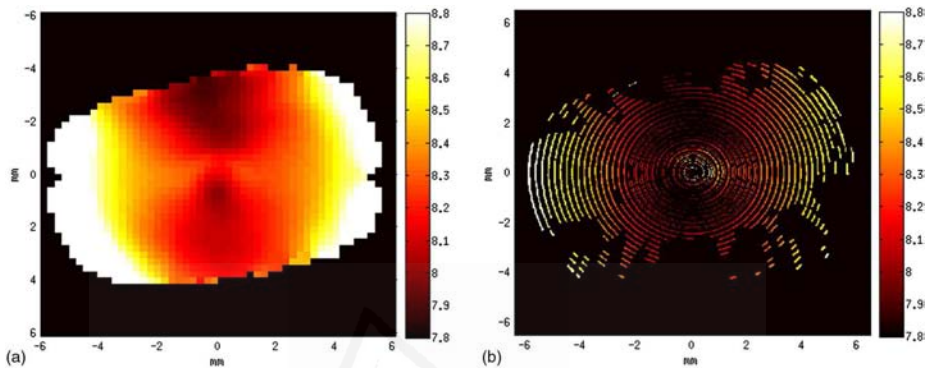


Figura 3.20 (a) Radio de curvatura para el Medmont. (b) Radio de curvatura obtenido por este método.

3.3 Aplicaciones en ingeniería civil

En el siguiente punto, nos centraremos en las aplicaciones de las técnicas de seguimiento en el campo de la ingeniería civil. De manera similar a las aplicaciones vistas en los apartados anteriores sobre dinámica ocular, donde se tomaba como diana la pupila humana o los anillos de Plácido, en este caso estas técnicas se basan en la detección y seguimiento del centro de una diana circular adherida a la estructura a analizar. Aplicando las técnicas de seguimiento en este campo es posible, a partir de la detección del desplazamiento obtener las frecuencias de vibración

de la estructura analizada, al contrario que en la dinámica ocular donde únicamente se detectan desplazamientos. Además, es interesante resaltar que cuando se realizan medidas en exteriores, hay que tener en cuenta que existen una serie de restricciones debido a la iluminación de la escena. El objeto que se pretende medir, como es el caso de las estructuras civiles, puede recibir directamente la luz del sol, pero dicha iluminación puede ser inestable debido a la presencia de nubes, cambios en el ángulo del sol o a la presencia incontrolada de sombras.

En este caso, se aplicará la técnica de seguimiento y detección de una diana, en la medida del desplazamiento y las vibraciones en una estructura civil, como es el caso de una columna de acero hueco de 2,1 m de altura compuesta por dos vigas soldadas que forma parte de una pequeña estructura, como es una escalera. Como se puede ver en la figura 3.21(a), los dos extremos de la columna están sujetos tanto al suelo como a la escalera.

Para producir el impacto que causará las vibraciones, se ha elegido una bola de acero de 0,44 kg montada en un péndulo de 1,5 m el cual está colgando de la parte superior de la columna. Soltando la bola a una distancia de 90 cm de la columna se consigue un impacto a una velocidad de 2,3 m/s (figura 3.21(b)). La vibración producida por dicho impacto se registra mediante la cámara Casio Exilim EX-FH20 enfocada a una diana adherida a la columna.

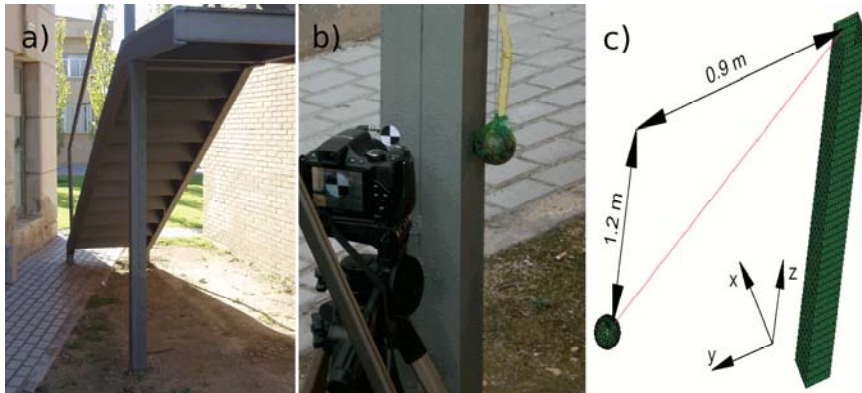


Figura 3.21 (a) Estructura medida. (b) Posición de la cámara y el péndulo. (c) Esquema del experimento y del modelo usado para la simulación de elementos finitos.

En la figura 3.21(c), podemos ver el esquema representativo del modelo. Dicho modelo implementado en un modelo de elementos finitos (FEM) usando el código LS-Dyna [LS-DYNA, 2003], considera tanto a la columna como a la bola elementos sólidos. El acero se modela como un material plástico y elástico con un módulo de Young de 210 Gpa, un módulo de Poisson de 0,3, densidad de 7850 kg/m^3 y una resistencia de 275 Mpa. Este modelo matemático ya se ha utilizado en un experimento similar [Lee, 2006], con la diferencia del tipo de cámara empleada y la técnica de detección.

Una vez se produce el impacto, se calcula el desplazamiento de la columna a la altura que se produce el mismo usando el análisis numérico. La vibración se puede considerar monomodal [Lee, 2006] por lo que puede ser fácilmente descrita como una

oscilación atenuada:

$$y(t) = Ae^{-\mu t} \sin(2\pi ft + \Phi); \quad (3.7)$$

donde A es la amplitud de la oscilación, f es la frecuencia, μ es la constante de atenuación y Φ es la fase en $t=0$.

Los datos obtenidos (tabla 3.8) con la simulación se ajustan a la ecuación (3.7), por tanto, los resultados obtenidos para los diferentes parámetros con un límite de confianza del 95%, y con un valor para el coeficiente de correlación de $r^2=0,9917$, (el subíndice s hace referencia a “simulación”) son:

Parámetros	Límites de confianza (95%)
$A_s=0,0933$ mm	[0,0936 mm 0,0943 mm]
$\mu_s=14,61$ s ⁻¹	[14,60 s ⁻¹ 14,75 s ⁻¹]
$f_s=66,7$ Hz	[66,5 Hz 66,8 Hz]
$\Phi_s=-1,572$ rad	[-1,575 rad -1,568 rad]

Tabla 3.8 Datos obtenidos en la simulación, para el cálculo de la vibración de la columna.

El desplazamiento real de la columna tras el impacto se registra colocando la cámara Casio en el lateral de la misma. Como suponemos que el movimiento será muy pequeño, la cámara se sitúa a unos 15 cm de la diana y se utiliza un modo macro.

Además, ya que se espera que la frecuencia de vibración no sea demasiado alta, la velocidad de adquisición es de 240 fps con una resolución espacial de 480 x 360 px. El contorno circular de la diana (figura 3.21(b)) se obtiene tras realizar un procesado de imágenes al igual que en los apartados anteriores. Para ello, se selecciona un umbral adecuado para el fotograma de acuerdo al nivel del fondo y se binariza. A continuación, se filtra la imagen binaria obtenida mediante una apertura numérica (A2.3) y se detecta el contorno por medio de una función de detección de bordes. Ajustando dicho contorno a una elipse (ec. 2.1), se obtiene el centro de coordenadas (A1.6).

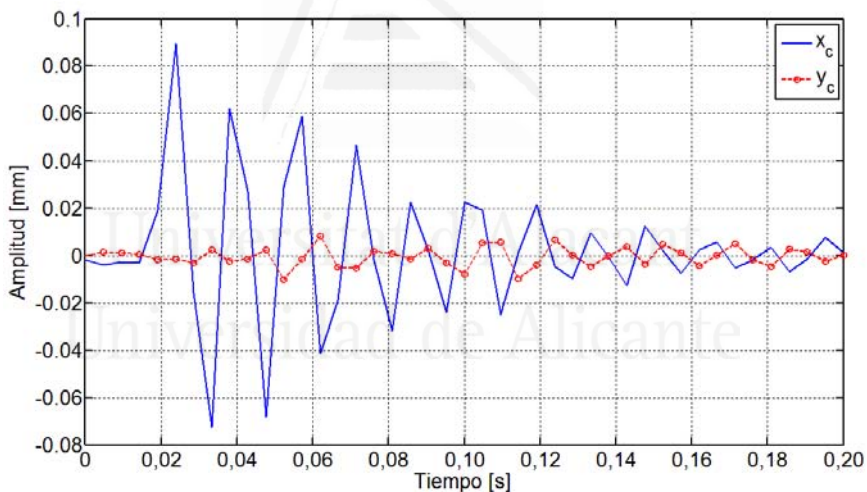


Figura 3.22 Coordenadas del centro de la diana.

Para validar los resultados de la simulación, se realizan tres pruebas diferentes. En la figura 3.22, podemos ver la evolución temporal del centro de la elipse. Al igual que ocurría en la

simulación, el movimiento se puede considerar monomodal, además se produce en dirección transversal y el impacto se puede apreciar claramente en el movimiento de la coordenada x_c del centro. Asimismo, se puede observar que la diana se mueve ligeramente en dirección vertical con un retraso de 0,04 s respecto al inicio de la vibración horizontal. Este movimiento residual proviene de la vibración transmitida desde el suelo hasta la cámara. Indudablemente, este efecto introduce ruido en la señal, pero no interfiere con el movimiento de la diana registrado.

Tal y como se hizo en el punto 3.1, se puede conocer la precisión del método analizando una secuencia de una diana estática. Ambas coordenadas x_c e y_c oscilan alrededor de una posición fija, en torno a 0,07 px (3xSTD). Considerando que el tamaño de la diana entera es de 2 cm, se obtiene una resolución de 17 px/mm, por tanto, obtenemos una resolución espacial en torno a 4 μ m.

Los resultados obtenidos para la coordenada x_c se ajustan a la ecuación (3.7). Se obtiene la transformada de Fourier de la señal obtenida, que se puede ver en la figura 3.23(a). En la figura 3.23(b), se representa un ejemplo de los datos obtenidos junto con el ajuste (oscilación monomodal atenuada).

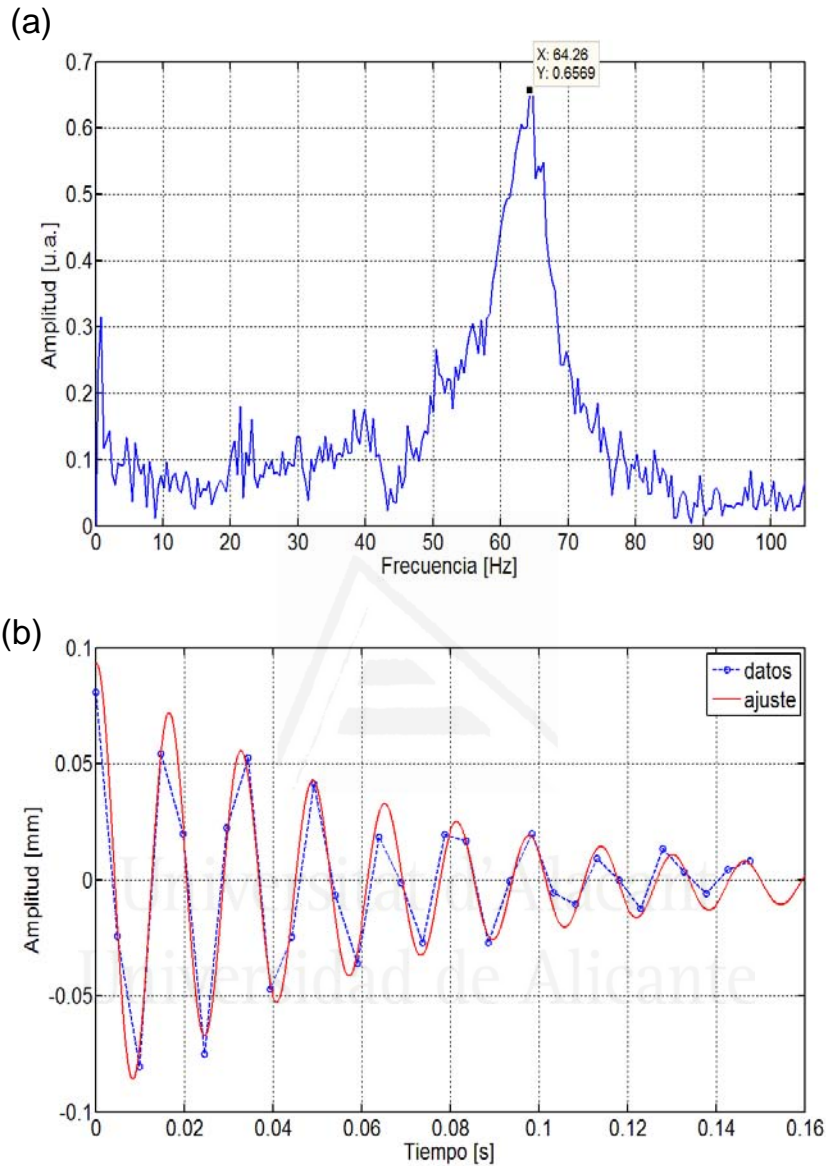


Figura 3.23 (a) Transformada de Fourier de la vibración de la columna obtenida a partir de la posición horizontal de la diana (ver figura 2.4). (b) Datos del ajuste a la ecuación (3.7).

En la tabla 3.9, se muestran los valores obtenidos para las tres pruebas realizadas junto con un límite de confianza del 95%. El valor de Φ se ha omitido del análisis ya que es diferente para cada caso y no añade información relevante.

	A(mm)	$\mu(s^{-1})$	f(Hz)	r^2
Test 1	0,103 [0,089 0,117]	15,6 [12,5 18,7]	61,0 [60,5 61,5]	0,9548
Test 2	0,096 [0,087 0,105]	15,5 [12,5 18,1]	61,6 [61,1 62,5]	0,9675
Test 3	0,103 [0,093 0,114]	15,8 [13,2 18,3]	61,3 [60,9 61,6]	0,9675
Media \pm std	0,101 \pm 0,004	15,6 \pm 0,4	61,3 \pm 0,3	
Desviación Relativa(%)	8,30%	6,80%	8,10%	

Tabla 3.9 Resultados obtenidos a partir la posición de la diana en un movimiento atenuado.

Comparando estos resultados con los obtenidos en la simulación, se puede ver que hay buena coincidencia entre el modelo y el experimento. Se puede apreciar un ligero desplazamiento tanto en la amplitud como en la frecuencia, este desplazamiento se puede deber a que el modelo no tiene en cuenta todas las condiciones de contorno de la estructura real (humedad del suelo, la estructura real, el material, las propiedades de la soldadura, etc.).

Capítulo 4. Validación y aplicaciones de las técnicas multiumbral

Las técnicas multiumbral tal y como se explicó en el punto 2.2, consideran la respuesta de un único píxel en presencia de un borde. Así, cuando se producen cambios en la distribución de la luz de una imagen binaria debidos a un movimiento del objeto, algunos píxeles del borde cambian aunque este movimiento sea más pequeño que el tamaño del sensor. Estos píxeles que cambian aportan información del movimiento a escala sub-píxel. Cuando el objeto vibra, varios niveles de luminancia se ven afectados por dicha vibración. Por tanto, para conocer la vibración principal, se realiza una umbralización multinivel de la imagen en diferentes niveles de gris. Así, se obtiene la variación de píxeles que cambian respecto al primer fotograma de los niveles afectados por esa vibración. Mediante una combinación adecuada de la transformada de Fourier de estos niveles se determina la vibración principal.

4.1 Validación de resultados

A fin de detectar vibraciones mediante técnicas multiumbral, se

han aplicado éstas a dos experimentos realizados en laboratorio, donde el entorno está controlado, para verificar los resultados que se obtienen al aplicar las mismas. Dichas medidas consisten en la detección de vibraciones que se producen paralelas y perpendiculares al plano imagen. En concreto, se han medido las vibraciones que se producen en un diapasón y en un altavoz.

Para ambas medidas, la cámara se sitúa a 75 cm de los objetos apoyada sobre un trípode. La iluminación en ambos casos consiste en una lámpara halógena de bajo voltaje de 50 W con un reflector dicróico. La lámpara está conectada a un estabilizador de corriente DC (corriente continua) que evita la detección del ciclo de corriente AC (corriente alterna) a 100 Hz. La iluminación es oblicua formando un ángulo de 30-45 grados respecto al eje que forman el objeto y la cámara. En todas las medidas que se realizan, se utiliza una cámara compacta, CASIO Exilim EX-ZR1000 [Casio Europe, 2013], la cual es capaz de grabar vídeos a diferentes velocidades, entre 120 y 1000 fps, con resolución espacial que varía desde 640 x 480 px para la resolución temporal más baja a 224 x 64 px para la más alta. Como ya sabemos, este tipo de cámaras introduce ruido al almacenar la secuencia debido al algoritmo de compresión JPEG-AVI.

El primer caso donde se aplica la técnica propuesta es en la medida de la vibración que se produce al golpear un diapasón con un martillo de goma (figura 4.1). Esta vibración se produce en dirección paralela al plano imagen y se registra por medio de dos

dispositivos, un micrófono y la cámara a una velocidad de 1000 fps. Los tres primeros segundos de la secuencia no se tienen en cuenta para evitar las interferencias producidas durante la manipulación de la cámara, de manera que se procesan únicamente los 1000 fotogramas siguientes.

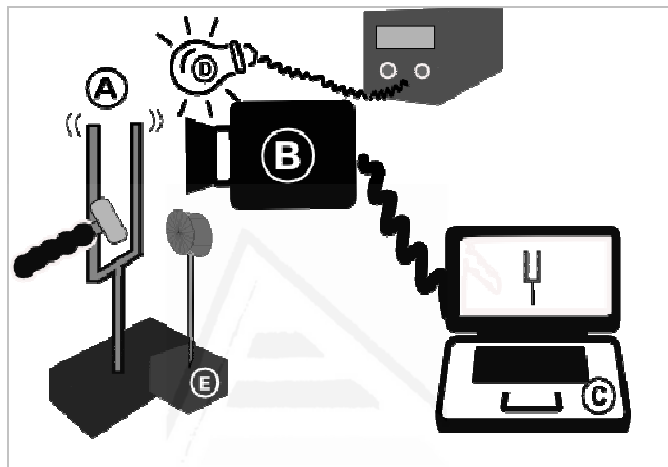


Figura 4.1 Esquema del experimento. Diapasón (A), cámara de alta velocidad (B), ordenador (C) y halógeno (D) y micrófono (E).

Para reducir el ruido y acelerar el cálculo, es mejor seleccionar una zona pequeña de la imagen, por este motivo el análisis de los fotogramas del diapasón se realiza teniendo en cuenta una pequeña región de la imagen como muestra la figura 4.2. La imagen contenida dentro de dicha región, se umbraliza a ocho niveles diferentes y equidistantes desde el mínimo al máximo. De esta manera, se obtienen las secuencias binarizadas que serán analizadas de manera independiente. En la figura 4.3, se muestran los ocho niveles para el primer fotograma de la secuencia

analizada.

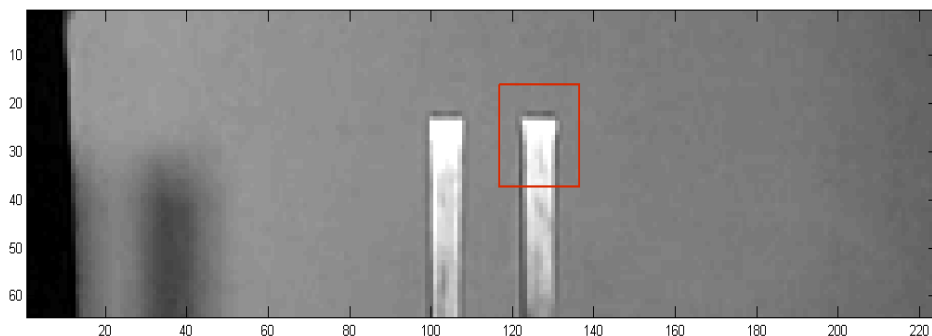


Figura 4.2 Fotograma de la secuencia donde se ven los extremos del diapasón vibrando y la región de interés analizada. El tamaño de dicha región es de 18 x 18 px.

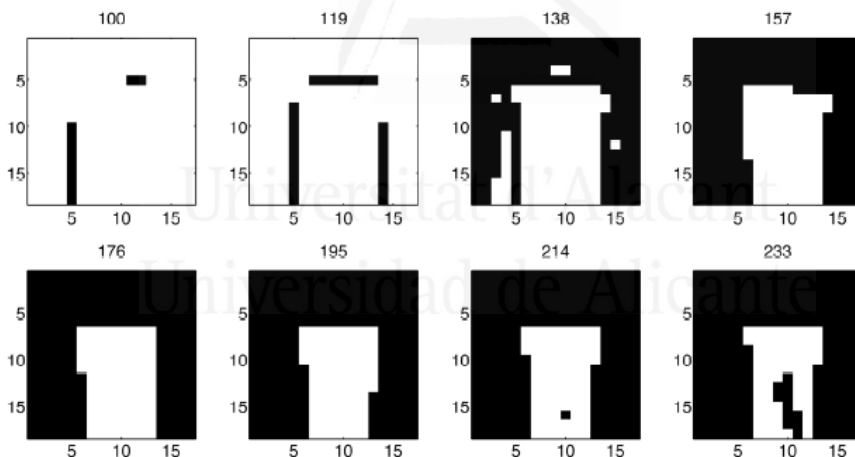
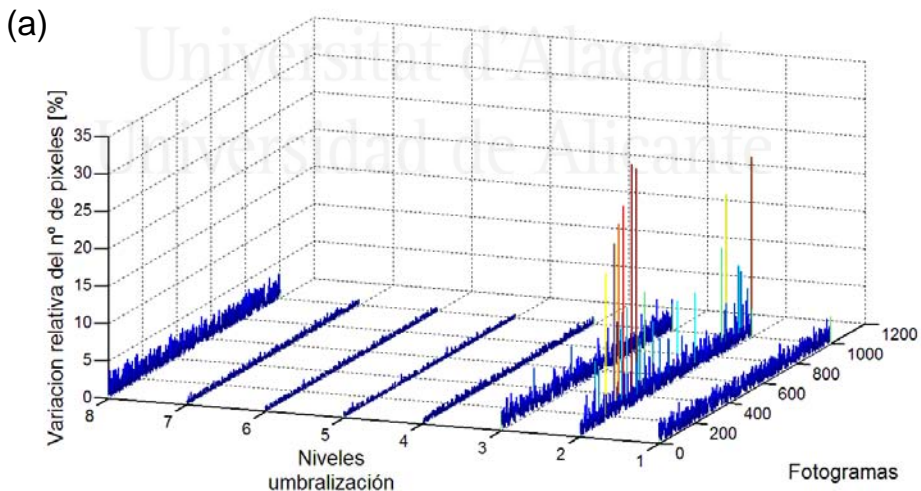


Figura 4.3 Niveles de umbralización para la región de interés seleccionada. En la parte superior de cada imagen está el nivel de gris de la umbralización.

El análisis de la región de interés, consiste en tomar cada secuencia binaria y contar la variación de píxeles activos con respecto al primer fotograma para, a continuación, calcular la

transformada de Fourier. En la figura 4.4(a), se muestra el porcentaje de variación relativa de píxeles para un tamaño de región de interés de (18 x 18 px) para cada nivel de umbralización. Podemos ver que en todos los niveles excepto en el nivel 2, la variación es menor del 5%. En la figura 4.4(b), se puede ver la transformada de Fourier de cada una de las ocho señales. En la mayoría de los niveles, se detecta claramente la frecuencia de 483 Hz. El diapasón tiene una frecuencia establecida de 480 Hz, pero la medida realizada con un micrófono muestra un pico con su frecuencia real de 481,9 Hz. Considerando que la precisión de nuestra medida es de ± 1 Hz y las imprecisiones que se producen en la adquisición por parte de una cámara de gama baja, podemos concluir que nuestras medidas proporcionan un resultado correcto, con un error por debajo de 0,5%.



(b)

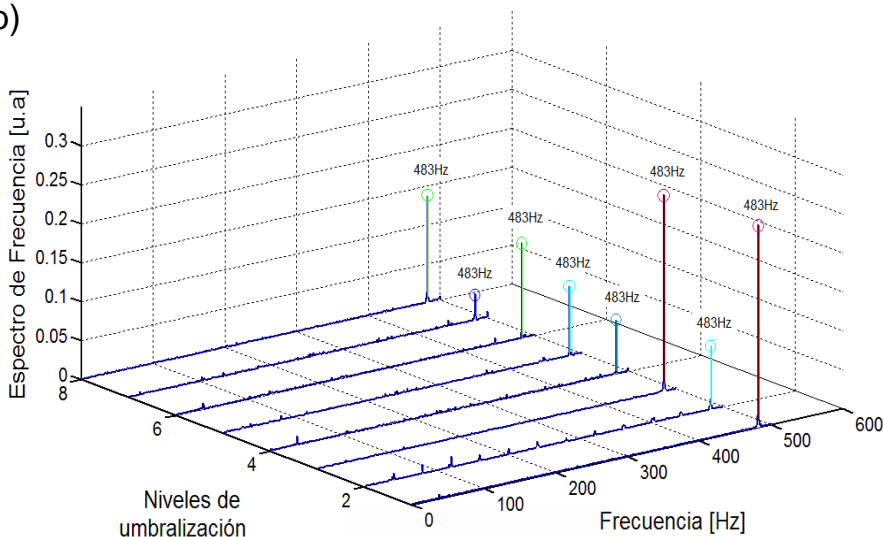


Figura 4.4 (a) Variación relativa con respecto al primer fotograma (valor absoluto) del número de píxeles. (b) Transformada de Fourier de la señal en (a).

Los resultados obtenidos a partir de la transformada de Fourier se pueden combinar para realzar los picos y reducir o incluso eliminar el ruido, por ejemplo considerando el promedio de los picos obtenidos.

Como segundo ejemplo se ha aplicado la técnica multiumbral, a la medida de la frecuencia de vibración de un altavoz, el cual se conecta a un ordenador por medio del cual se generan dos frecuencias de sonido (317 y 412 Hz). La vibración de la membrana del altavoz (perpendicular al plano imagen), al igual que en el caso del diapasón, se captura a través de dos dispositivos, un micrófono y la cámara a una velocidad de 1000 fps. En este caso, la selección de la región de interés no es

tan obvia como en el caso del diapasón ya que, como vemos en la figura 4.5, el contraste es muy bajo, y únicamente en la parte inferior aparece una zona más brillante donde podemos localizar las frecuencias.

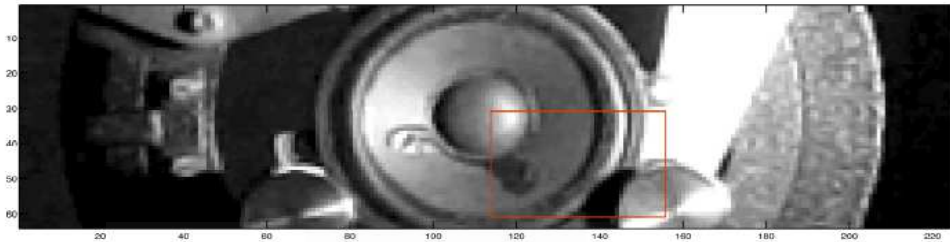


Figura 4.5 Membrana del altavoz en vibración y la región de interés seleccionada. El tamaño de la región es de 17 x 36 px.

Una vez seleccionada el área de interés, se procesa la secuencia del mismo modo que se hizo para el diapasón. Los resultados obtenidos tanto con el micrófono como con la cámara se pueden ver en la figura 4.6. Cada uno de estos resultados se normaliza a su frecuencia máxima para permitir una mejor comparación de los espectros de potencia. Podemos ver, que tanto la cámara como el micrófono detectan las dos frecuencias principales con las que vibra el altavoz, incluso se detecta una tercera que puede ser debida a las distorsiones de la membrana. Sin embargo, la altura relativa entre los picos, registrada por el micrófono es diferente a la registrada por la cámara. La técnica aplicada en el experimento, únicamente cuenta píxeles, es decir la altura de los picos no está directamente relacionada con ninguna magnitud física.

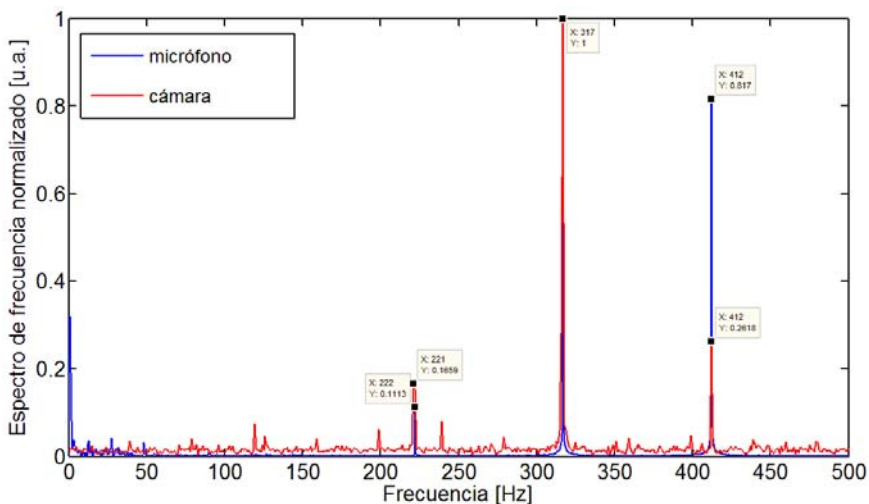


Figura 4.6 Frecuencia del espectro normalizada obtenida analizando el número de píxeles que varían (cámara) en rojo y de la intensidad de sonido (micrófono) en azul medida a partir de la membrana del altavoz.

4.2 Técnicas multiumbral aplicadas a ingeniería civil

Universitat d'Alacant
 Universidad de Alicante

Para mostrar el funcionamiento del método multiumbral en un caso más general, lo aplicamos a la medida de la vibración principal de una pequeña estructura, en concreto una pasarela interior y elevada, de unos 6,6 m de longitud que conecta dos partes de un edificio, tal como se puede ver en la figura 4.7.



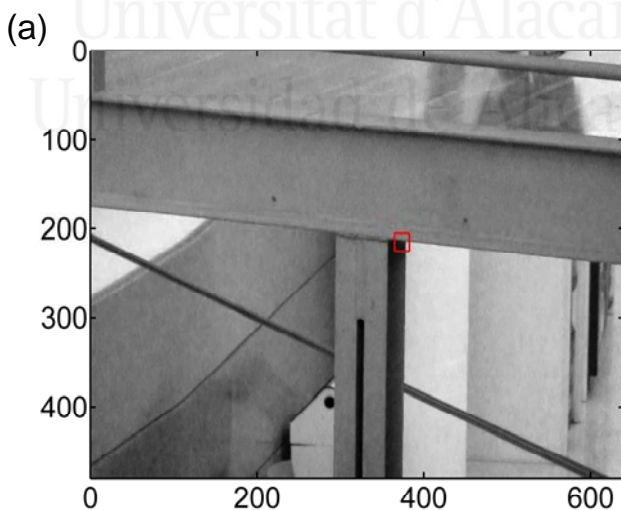
Figura 4.7 Pasarela dentro de un edificio de la Universidad de Alicante.

La vibración, y por tanto el modo principal de la misma, se genera mediante el salto de una persona situada en el centro de la pasarela. Para detectar y medir la oscilación de la misma, la cámara se coloca a su mismo nivel, en el lado derecho a unos 15 m del centro de la misma. La oscilación se registra usando la misma cámara que en el punto 4.1, es decir, una cámara CASIO Exilim EX-ZR1000 [Casio Europe, 2013] que trabaja a una velocidad de 120 fps. Además, se coloca un acelerómetro monomodal situado en el centro de la pasarela. La señal procedente del acelerómetro se selecciona a partir de los dos segundos y medio después del impacto para evitar efectos pasajeros y distinguir claramente la frecuencia principal.

En este caso, la iluminación ambiente es suficiente y no es necesario utilizar fuentes de iluminación adicionales. La secuencia de vídeo se registra apoyando la cámara en un trípode, evitando así la utilización de cables o lámparas adicionales. Por el contrario,

los acelerómetros, necesitan conectarse a la corriente eléctrica, y un módulo de adquisición se debe conectar por medio de un cable tanto a un ordenador como al acelerómetro.

Una vez hemos obtenido la secuencia, se debe seleccionar la región de interés que será analizada. En este caso, dicha región es la que se encuentra situada en el centro de la pasarela (figura 4.8(a)). Ya que, el número de píxeles que cambian su estado es muy bajo, se debe seleccionar una ventana muy pequeña (13 x 15 px) para mejorar la razón señal-ruido. En la figura 4.8(b) se muestra la señal del acelerómetro obtenida, junto con la ventana temporal analizada. La elección de esa ventana temporal es debida a que la señal es más estable evitando así efectos transitorios con el fin de detectar claramente la frecuencia principal.



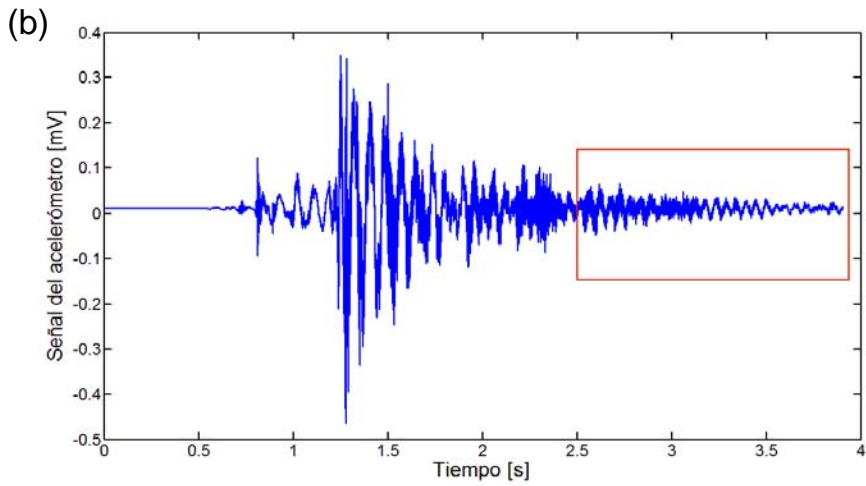


Figure 4.8 (a) Fotografía tomada de la secuencia de la pasarela y la ROI seleccionada de tamaño 13 x15 px. (b) Señal del acelerómetro y la ventana de tiempo analizada.

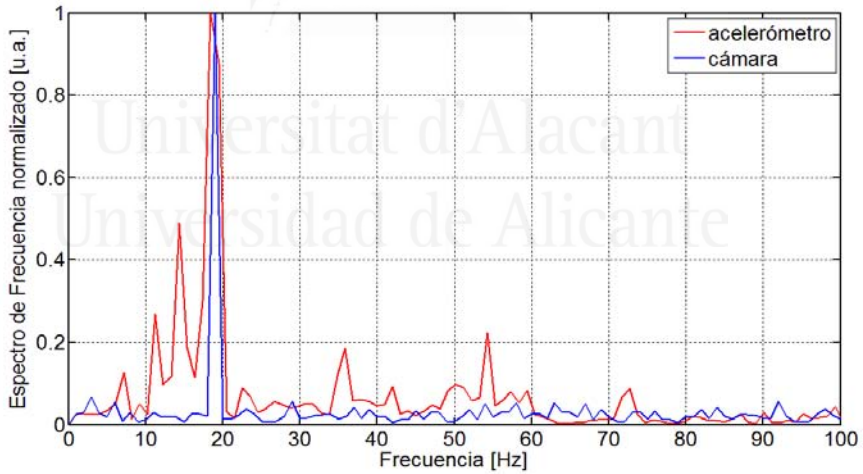


Figura 4.9 Frecuencia del espectro normalizada, obtenida para la cámara y para el acelerómetro.

En la figura 4.9, se pueden ver las frecuencias medidas con el acelerómetro y con la cámara. Podemos comprobar que la frecuencia registrada por ambos dispositivos es prácticamente la misma. Existen algunas discrepancias en lo que se refiere a las bases de los picos, donde el acelerómetro detecta picos secundarios que se pierden en el análisis del vídeo. Sin embargo, el modo principal se detecta claramente por ambos dispositivos.

Llegados a este punto, conviene señalar que en este caso, donde se detecta la vibración de la pasarela, sería posible colocar una diana con forma elíptica y aplicar el método de detección y seguimiento de la elipse desarrollado anteriormente, para obtener el desplazamiento y la frecuencia de vibración de la misma. Sin embargo, se demuestra que con el método multiumbral se puede medir la vibración sin la necesidad de utilizar dianas, incluso si la pasarela fuera totalmente inaccesible. El uso del acelerómetro está justificado, ya que se emplea para comparar y comprobar los resultados obtenidos con el método propuesto.

Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas

A lo largo de este trabajo se han desarrollado dos técnicas, una de ellas una técnica de seguimiento para la medida de desplazamientos y otra técnica multiumbral para la detección de vibraciones de pequeña amplitud. Además, se han comprobado diversas aplicaciones de dichas técnicas en diferentes campos como son la ingeniería civil y la biomedicina, en concreto en el estudio de la dinámica ocular.

En el capítulo 2, se ha presentado una técnica de seguimiento, basada en la detección del contorno de una diana con forma conocida, en concreto con forma elíptica. Esta técnica, permite la medida de pequeños desplazamientos, así como de vibraciones, reduciendo el ruido presente en las imágenes y se ha obtenido resolución sub-píxel por medio del ajuste del contorno de la diana por mínimos cuadrados. También se ha desarrollado una técnica multiumbral, por medio de la cual se ha demostrado que es posible medir vibraciones de un objeto siempre y cuando la resolución temporal del vídeo sea lo suficientemente alta. En dicha técnica, no es necesario el uso de dianas como objeto de referencia y debemos recordar que el éxito de los resultados depende mucho de la región de interés que se escoja.

En ambas técnicas, se han utilizado cámaras de gama baja para

obtener las secuencias de imágenes, aunque se pueden realizar con cámaras de calidad superior, que además de aumentar la velocidad de adquisición [AOS Technologies, 2013], aportarían mejor resolución espacial y no utilizan algoritmos de compresión evitando la presencia de ruido y por tanto mejoran la calidad de la imagen. Pero el uso de dichas cámaras, implica un gasto elevado, y además está limitado al entorno donde se realicen las medidas, ya que necesitan dispositivos externos para poder funcionar, como pueden ser ordenadores que almacenen las secuencias y tomas de luz. Una aportación de este trabajo, es que se ha demostrado que existe la posibilidad de utilizar cámaras compactas que pueden registrar secuencias a alta velocidad, por ejemplo para el seguimiento de objetos. Este tipo de dispositivo, funcionan con batería y guardan los datos en una tarjeta interna, con lo que se evitan las conexiones a dispositivos externos, además su coste es mucho menor que para una cámara de calidad superior. Por tanto, en este trabajo se prueba que la cámara compacta puede medir con gran precisión, movimientos muy pequeños y rápidos, consiguiendo mejorar la precisión en la detección de esos pequeños movimientos en más de un orden de magnitud, siendo capaz de registrar movimientos de 2 arc sec a una distancias de 10 m o su equivalente, 1 mm a 100 m.

En los capítulos 3 y 4, se han mostrado diferentes aplicaciones de ambas técnicas. Por una parte, en el capítulo 3, se ha aplicado la técnica de seguimiento para el estudio de la dinámica ocular. Mediante la detección y reconocimiento de una forma conocida

como es la elipse, forma que define a la pupila humana, hemos sido capaces de detectar y estudiar los movimientos de fijación que realiza el ojo humano, en concreto los microsacádicos y las derivas, así como las cicl torsiones, aunque en este último caso los resultados no han sido muy buenos, siendo necesario una mejora de la técnica.

Además, se ha podido estudiar el reflejo pupilar bajo condiciones fotópicas consiguiendo una resolución de 2 ms, un orden de magnitud superior a la de otros estudios. Hemos estudiado, la contracción del radio de pupila después de recibir el estímulo luminoso. Debido al diseño binocular del montaje y a la sincronización de las dos cámaras empleadas, ha sido posible evaluar el reflejo pupilar de ambos ojos a la vez, teniendo en cuenta la dominancia ocular y los reflejos directo y consensual. Sin embargo, hasta donde sabemos, es la primera vez que se da evidencia de una contracción temprana que se produce antes del tiempo establecido de la contracción pupilar, concretamente en torno a 0,05 s. El fenómeno aparece en ambos ojos para todos los observadores. Teniendo en cuenta que esta velocidad de reacción es del orden de un sacádico, es posible que estén relacionados, y que su origen sea el mismo. Obviamente, es necesario realizar más experimentos que impliquen electro-encefalografía y electromiografía para confirmar los hallazgos y explicar adecuadamente el fenómeno que aquí se ha encontrado.

Asimismo, partiendo del desarrollo del algoritmo de detección de

elipses, se propone su aplicación en la detección de los anillos de Plácido de un topógrafo, con el objetivo de solucionar ciertos problemas que presenta tanto en el acceso a los datos obtenidos como en el ajuste de las superficies ópticas. Para solucionar este tipo de problemas, sería de gran utilidad el acceso abierto al software y a los parámetros de la cámara ya que permite realizar experimentos más complejos que los que se pueden hacer con dispositivos comerciales. Como hemos comprobado, es posible introducir modificaciones en el proceso de calibración, en la resolución temporal y espacial de la cámara así como, en el algoritmo numérico para obtener más información sobre el proceso dinámico de la córnea y la película lagrimal.

El algoritmo de escaneado elíptico permite analizar regiones anulares de la superficie, con lo que se reduce la densidad de muestreo desigual en diferentes sectores de la superficie muestreada permitiendo la mejora del ajuste de las superficies ópticas. El método proporciona una alta densidad de datos de la curvatura corneal, lo que hace posible el análisis de pequeños defectos corneales, evolución de cicatrices, úlceras etc.

Los resultados obtenidos en esta última aplicación, es decir, en la calibración del topógrafo resultan de gran utilidad estos días, ya que son aspectos a tener en cuenta en la realización de cirugía ocular [Mrochen, 2001], así como en el empleo de lentes de contacto. En este tipo de cirugías es importante tener en cuenta, la variación del diámetro pupilar, así como los movimientos oculares

en el uso del “eye-tracking”. También es necesario conocer la variación del tamaño pupilar en el empleo de lentes de contacto, para determinar la zona óptica de la misma o en el uso de lentes de contacto multifocales, donde existen varias zonas de visión [Bennet, 2008].

En cuanto al campo de la ingeniería civil, se ha aplicado la técnica de seguimiento mediante la detección de una elipse para el análisis del desplazamiento de una columna de acero con gran precisión. Este método permite la medida de vibraciones micrométricas en un amplio rango de frecuencias.

En lo que se refiere a la técnica multiumbral, en el capítulo 4 primeramente se ha aplicado dicha técnica en la medida de vibraciones de objetos comunes, es decir, se ha aplicado en la detección de las vibraciones de un diapasón y un altavoz. Como hemos dicho, los resultados dependen de la región de interés que se elija, por eso en el caso del diapasón la elección es obvia y se espera que la amplitud del movimiento en el extremo del mismo sea máxima. En el caso del altavoz, el contraste es relativamente bajo, imágenes con bajo contraste normalmente presentan pequeñas diferencias entre niveles, y por tanto, la redundancia se pierde. Como el objetivo de este algoritmo es detectar únicamente la frecuencia de vibración, no se pretende estimar ni la velocidad ni la dirección de movimiento, por lo que resulta ser un algoritmo más eficiente y rápido que otros algoritmos.

Tras realizar las medidas en objetos comunes, se ha comprobado que es una técnica sencilla para la detección de vibraciones a varios metros de distancia de una estructura civil como una pasarela peatonal. Dichas medidas se realizan sin utilizar dispositivos de contacto y se puede considerar un método alternativo a los vibrómetros tradicionales. También, es posible optimizar la umbralización multinivel y la combinación entre los diferentes niveles. Un algoritmo que determine de manera automática el tamaño y la localización de la región de interés también supondría una mejora considerable del método.

Por una parte y teniendo en cuenta los buenos resultados con el empleo de las técnicas de seguimiento, se plantean varias perspectivas de futuro al respecto. Entre ellas, se considera continuar investigando el reflejo pupilar temprano encontrado en este trabajo, para ver, si existe alguna relación con alguna alteración neurológica, o si es posible establecer su origen. También, se está valora seguir trabajando en la aplicación del algoritmo de detección de elipses al topógrafo corneal, y quizá probar diferentes tipos de ecuación de ajuste.

En cuanto a los interesantes resultados obtenidos con dichas técnicas en el campo de ingeniería civil sigue abierta la posibilidad de continuar trabajando en la detección y medida de pequeñas vibraciones en estructuras civiles. El objetivo inmediato es poder realizar medidas y aplicar dichas técnicas a estructuras civiles de gran tamaño. Dentro de este tipo de estructuras podemos

englobar puentes, carteles publicitarios o pasarelas peatonales. Es interesante conocer y medir las vibraciones en estas estructuras ya que se someten a la acción de factores externos, como pueden ser el viento, el paso de vehículos por encima de ellas, vibraciones del terreno donde se encuentran construidas, etc. y es importante conocer cuál es su comportamiento frente a la influencia de dichos factores.

Por otra parte, respecto a la técnica multiumbral, se considera obtener información sobre el desplazamiento de los píxeles en la región de interés, y, a partir de este desplazamiento, estimar la amplitud de vibración del objeto que se analiza. Esta técnica multiumbral, únicamente se ha aplicado en el campo de la ingeniería civil aunque está en fase de prueba su aplicación en el estudio de la dinámica ocular para la detección de las frecuencias de los movimientos oculares.

Además, nuestro interés también se centra en el uso de cámaras de gama-baja para la medida de dichas vibraciones y desplazamientos, debido a las ventajas de portabilidad y comodidad a la hora de realizar las medidas que en ocasiones no presentan las cámaras de gama alta. Aunque es cierto, que es necesario compensar los inconvenientes en cuanto a resolución espacial y temporal de las cámaras de gama baja, así como la influencia negativa de los algoritmos de compresión en las imágenes adquiridas.

Como muchas de estas medidas, se deben realizar a distancias muy largas, debidas a las condiciones del entorno donde se encuentra la estructura, se puede considerar el uso de un sistema telescópico. La cámara se acoplaría a este sistema, el cual se situaría a una distancia mucho mayor que la distancia en los experimentos realizados. Actualmente se está trabajando en este aspecto, en la utilización de un sistema telescópico para poder realizar medidas en estructuras en exteriores las cuales se encuentren a grandes distancias y sin utilizar apoyo instrumental adicional.

Por tanto, en vista de los resultados obtenidos tanto en la medida de vibraciones estructurales, como en el estudio de la dinámica ocular, tanto las técnicas de detección y seguimiento como las técnicas multiumbral, son una buena opción para el estudio de vibraciones. Especialmente pueden aportar información interesante acerca del comportamiento de estructuras civiles de gran envergadura, lo que sería una aportación importante a la hora de la construcción, mantenimiento y seguridad de dichas estructuras.

Referencias

[AOS Technologies,2013] AOS Technologies at, <http://www.aostechnologies.com/high-speed-imaging/products-high-speed/> (visto por última vez 10/09/2013).

[Barbur,2004] Barbur,J.L., “*Learning from the pupil-studies of basic mechanisms and clinical applications*”, In *The Visual Neurosciences*, Eds. L. M. Chalupa and J. S. Werner, (Cambridge, MA: MIT Press, 2004).

[Bennet,2008] Bennet,E.S., “*Contact lens correction of presbyopia*”, *Clin. Exp. Optom.*, **91**(3), (265–278), 2008.

[Bergamin,2003] Bergamin,O., Kardon,R.H., “*Latency of the pupil light reflex: sample rate, stimulus intensity, and variation in normal subjects*”, *Invest. Ophth. Vis. Sci.*, **44**, (1546-1554), 2003.

[Binda,2013] Binda,P., Pereverzeva,M., Murray,S.O., “*Pupil constrictions to photographs of the sun*”, *J. Visi.*, **13**(6), (1-9), 2013.

[Bouma,1971] Bouma,H., Baghius,L.C.J., “*Hippus of the pupil: periods of slow oscillations of unknown origin*”, *Vision Res.*, **11**, (1345–1351), 1971.

[Bruckstein,1998] Bruckstein,A.M., O’Gorman,A., “*Design of shapes for precise Image registration*”, IEEE Trans. Inf. Theory, **44**, (3156–3162), 1998.

[Casio Europe, 2013] Casio Europe at <http://www.casio-europe.com/euro/exilim/exilimzrserie/exzr1000/> (visitado por última vez 09/03/2013).

[Chang,2008] Chang,J., “*Cyclotorsion during laser in situ keratomileusis*”, J. Cataract. Refract. Surg., **34**, (1720–1726), 2008.

[Chernyak,2004] Chernyak,D.A., “*Cyclotorsional eye motion occurring between wavefront measurement and refractive surgery*”, J. Cataract. Refract. Surg., **30**, (633–639), 2004.

[Collewijn,1975] Collewijn,H., Van der Mark,F., Jansen,T.C. “*Precise recording of human eye movements*”, Vision Res.,**14**, (447–450), 1975.

[Cornsweet,1973] Cornsweet,T.N., Crane,H.D., “*Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images*”, J. Opt. Soc. Am., **63**(8), (921-928), 1973.

[De Carvalho,2002] De Carvalho,L.A.V., Romao,A.C., Tonissi,S., Yasuoka,F., Castro,J.C., Schor,P., Chamon,W., “*Videokeratograph (VKS) for monitoring corneal curvature during surgery*”, Arq. Bras.

Oftalmol., **65**, (37–41), 2002.

[De Santis,2006] De Santis,A., Iacovello,D., “*Optimal segmentation of pupillometric images for estimating pupil shape parameters*”, Comput. Methods Programs Biomed., **84**, (174–187), 2006.

[Engbert,2004] Engbert,R., Kliegl,R., “*Microsaccades keep the eyes balance during fixation*”, Psychological Science, **15**, (431-436), 2004.

[Espinosa,2013] Espinosa,J., Ferrer,B., Mas,D., Pérez,J., Roig,A.B., “*Método y sistema para medir vibraciones*”, Patente en trámite nº P201300498 (05–23–2013).

[Fan,2011] Fan,X., Yao,G., “*Modeling transient pupillary light reflexes induced by a short light flash*”, IEEE T. Bio. Med. Eng., **58**, (36-42), 2011.

[Ferman,1987] Ferman,L., Collewyn,H., Jansen,T.C., Van den Berg,A.V., “*Human gaze stability in the horizontal, vertical and torsional direction during voluntary head movements, evaluated with a three-dimensional scleral induction coil technique*”, Vision Res., **27**, (811–828), 1987.

[Ferrari,2010] Ferrari,G.L., Marques,J., Gandhi,R.A., Heller,S.R., Schneider,F.K., Tesfaye,S., Gamba,H.R., “*Using dynamic*

pupillometry as a simple screening tool to detect autonomic neuropathy in patients with diabetes: a pilot study", Biomed. Eng. Online, **9**, (1-16), 2010.

[Ferrer, 2011] Ferrer,B., Espinosa,J., Pérez,J., Ivorra,S., Mas,D., "*Optical scanning for structural vibration measurement*", Res. Nondestruct. Eval., **22**, (61-75), 2011.

[Ferrer, 2013] Ferrer,B., Pomares,J.C., Irlles,R., Espinosa,J., Mas,D., "*Image processing for safety assessment in civil engineering*" Appl. Opt., **20**(52), (4385-4390), 2013.

[Fotiou,2000] Fotiou,F., Fountoulakis,K., Tsolaki,M., Tsorlinis,H., Goulas,A., Alexopoulos,L., "*Changes in the pupil reaction to light in Alzheimer's disease patients*", Int. J. Psychophysiol., **37**, (111-120), 2000.

[Fotiou,2000] Fotiou,F., Fountoulakis,K.N., Goulas,A., Alexopoulos,L., Palikaras,A., "*Automated standardized pupillometry with optical method for purposes of clinical practice and research*", Clinical Physiology, **20**, (336-347), 2000.

[Fry,1962] Fry,G.A., "*The center of rotation of the eye*", Am. J. Optom. Arch. Am. Acad. Optom., **39**, (581–595), 1962.

[Gal,2013] Gal,O., <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fitellipse> (visto por última vez 04.27.2010).

[Gentile,2007] Gentile,C., Saisi,A., “*Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment*”, *Constr. Build. Mater.*, **21**, (1311–1321), 2007.

[Goto,2003] Goto,T., Zheng,X., Klyce,S.D., Kataoka,H., Uno,T., Karon,M., Tatematsu,Y., Bessyo,T., Tsubota,K., Ohashi,Y., “*A new method for tear film stability analysis using videokeratography*”, *Am. J. Ophthalmol.*, **135**, (607–612), 2003.

[Hamm,2010] Hamm,J.P., Dyckman,K.A., Ethridge,L.E., McDowel,J.E., Clementz,B.A., “*Preparatory activations across a distributed cortical network determine production of express saccades in humans*”, *J. Neurosci.*, **30**, (7350-7357), 2010.

[Iskander,2004] Iskander,R., Collins,M.J., “*Applications of high-speed videokeratoscopy*”, *Clin. Exp. Optom.*, **88**, (399–407), 2004.

[Kenyon,1985] Kenyon,R.T., “*A soft contact lens search coil for measuring eye movements*”, *Vision Res.*, **25**, (1629–1633), 1985.

[Kirchner,2006] Kirchner,H., Thorpe,S.J., “*Ultra-rapid object detection with saccadic eye movements: visual processing speed revisited*”, *Vision Res.*, **46**, (1762:1776), 2006.

[Klein,2000] Klein,S.A., “*Corneal topography: a review, new ANSI standards and problems to solve*” in *Vision Science and its Applications*, OSA Technical Digest (Optical Society of America,

2000), paper NW8.

[Laeng,2012] Laeng,B., Endestad,T., “*Bright illusions reduce the eye’s pupil*”, PNAS, **109**(6), (2162-2167), 2012.

[Laeng,2014] Laeng,B., Sulutvedt,U., “*The eye pupil adjusts to imaginary light*”, Pyschol. Sci., **15**(1), (188-197), 2014.

[Lee,2006] Lee,J., Shinozuka,M., “*A vision-based system for remote sensing of bridge displacement*”, NDT & E International, **39**, (425–431), 2006.

[Lee,2007] Lee,J., Fukuda,Y., Shinozuka,M., Cho,S., Yun,C., “*Development and application of a vision-based displacement measurement system for structural health monitoring of civil structures*”, Smart Struct. Syst., **3**(3), (373–384), 2007.

[Li,2009] S.Z. Li (Ed.), Encyclopaedia of Biometrics, New York: Springer, 2009.

[Lowenstein,1942] Lowenstein,O., Friedman,E.D., “*Pupillographic studies*”, Arch. Ophthalmol., **27**, (969-993), 1942.

[Lowenstein,1954] Lowenstein,O., “*Clinical pupillometry symptoms and lesions of the optic nerve, optic chiasm and optic tract*”, AMA Arch. Ophthalmol., **52**, (385-403), 1954.

[LS-DYNA,2003] LS-DYNA Keyword User's Manual (v.970), Livermore Software Technology Corporation, April 2003.

[Maalen-Johansen,1993] Maalen-Johansen,I.,“*On the precision of sub-pixel measurements in videometry*”, Proc. SPIE, **2252**, (169–178), 1993.

[Marg,1951] Marg,E., “*Development of electro-oculography; standing potential of the eye in registration of eye movement*”, AMA Arch. Ophthalmol., **45**, (169–185), 1951.

[Mas,2010 (A)] Mas,D., Domenech,B., Espinosa,J., Pérez,J., Hernández,C., Illueca,C., “*Non invasive measurement of eye retraction during blinking*”, Opt. Lett., **35**, (1884–1886), 2010.

[Mas,2010 (B)] Mas,D., Kowalska,M.A., Espinosa,J., Kasprzak,H., “*Custom design dynamic videokeratometer*”, J. Mod. Opt., **57**, (94–102), 2010.

[Mathôt,2013] Mathôt,S., van der Linden,L., Grainger,J., Vitu,F., “*The pupillary light response reveals the focus of covert visual attention*”, PloS ONE, **8**(10), (1-10), 2013.

[Mathworks,A] Mathworks Inc., <http://www.mathworks.es/es/help/images/ref/wiener2.html>. Visto por última vez, Marzo 2014.

[Mathworks,B] Mathworks Inc, <http://www.mathworks.es/help/>

toolbox/images/. Visto por última vez, Marzo 2014.

[Mrochen,2001] Mrochen,M., Salah,E.M., Maemmerer,M. et al. "*Improvements in photorefractive corneal laser surgery results using an active eye-tracker system*", J. Cataract Refract. Surg., **27**, (1000-1006), 2001.

[Naber,2013] Naber,M., Nakayama,K., "*Pupil responses to high-level image content*", J. Vision, **13**(6), (1-7), 2013.

[Nassif,2005] Nassif,H.N., Gindy,M., Davis,J., "*Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration*," NDT Int., **38**(3), (213–218), 2005.

[O'Gorman,1990] O'Gorman,L., Bruckstein,A.W., Bose,C.B., Amir,I., "*Subpixel registration using a concentric fiducial*" Proc. 10Th Int. Conf. Pattern Recognition, (249-253), Atlantic City, 1990.

[Pons,2004] Pons,A.M., Martínez,F.M., "*Fundamentos de visión*". PUV, 2004.

[Porter,2005] Porter,J., Yoon,G., MacRae,S., Pan,G., Twietmeyer,T., Cox,I.G., Williams,D.R., "*Surgeon offsets and dynamic eye movements in laser refractive surgery*", J. Cataract Refract. Surg., **31**, (2058–2066), 2005.

[Red Eléctrica Española,2013] Red Eléctrica Española: respuesta

a consulta personal de información. Fecha de consulta 25-06-2013.

[Roberts,1994] Roberts,C., “*Characterization of the inherent error in a spherically-biased corneal topography system in mapping a radially aspheric surface*”, J. Refract. Corneal Surg., **10**, (103–111), 1994.

[Robinson,1963] Robinson,D.A., “*A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field*”, IEEE Trans. Biomed. Eng., **10**, (137–145),1963.

[Robinson,1972] Robinson,D.A., “*Eye movements evoked by collicular stimulation in the alert monkey*”, Vision Res., **12**, (1795–808), 1972.

[Scherer,1991] Scherer,H., Teiwes,W., Clarke,A.H., “*Measuring three dimensions of eye movement in dynamic situations by means of videooulography*”, Acta Otolaryngol., **111**, (182–187), 1991.

[Serra,1983] Serra,J., *Image Analysis and Mathematical Morphology* (Academic, 1983).

[Shortis,1994] Shortis,M.R., Clarke,T.A., Short,T., “*Comparison of some techniques for the sub-pixel location of discrete target image*”, Proc. SPIE, **2350**, (239–250), 1994.

[Shortis,1995] Shortis,M.R., Clarke,T.A., Robson,S., “*Practical testing of the precision and accuracy of target image centring algorithms*”, Proc. SPIE, **2598**, (65–76), 1995.

[Smith,1979] Smith, S.A., Ellis, C.J.K., Smith, S.E., “*Inequality of the direct and consensual light reflexes in normal subjects*”, Br. J. Ophthalmol., **63**, (523-527), 1979.

[Spauschs,1999] Spauschus,A., Marsden,J., Halliday,D.M., Rosenberg,J.R., Brown,P., “*The origin of ocular microtremor in man*” Exp. Brain Res., **126**, (556–562), 1999.

[Stiros,2008] Stiros,S.C., “*Errors in velocities and displacements deduced from accelerographs: An approach based on the theory of error propagation*”, Soil. Dyn. Earthq. Eng., **28**, (415–420), 2008.

[Toshiaki,2008] Toshiaki,Y., “*Nystagmus as a sign of Labytinyhine disorders-three-dimensional analysis of nystagmus*”, Clin. Exp. Otorhinolarngol.,**1**, (63-74), 2008.

[Trinder,1995] Trinder,J.C., Jansa,J., Huang,Y., “*An assessment of the precision and accuracy of methods of digital target localization*”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **50**, (12–20), 1995.

[Wang,2012] Wang,C, Boehnke,S.E., White,B.J., Munoz,D.P., “*Microstimulation of the monkey superior colliculus induces pupil*

dilation without evoking saccades”, J. Neurosci., **32**, (3629-3636), 2012.

[Wyatt,1981] Wyatt,H.J., Musselman,J.F., “*Pupillary light reflex in humans evidence for an unbalanced pathway from nasal retina and for signal cancellation in brainstem*”, Vision Res., **21**, (513-525), 1981.

[Wyatt,1995] Wyatt,H.J., “*The form of the human pupil*”, Vision Res., **35**, (2021–2036), 1995.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Anexo 1 La elipse y sus parámetros

Una elipse está determinada por la siguiente ecuación:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (\text{A1.1})$$

Primero, estudiamos la orientación de la elipse en relación a los ejes de coordenadas. Si el coeficiente B es igual a cero indica que los ejes de la elipse son paralelos a los ejes de coordenadas. En el caso, si $C > A$ la elipse presenta el eje mayor paralelo al horizontal. En caso contrario, el eje mayor es paralelo al vertical. La posición del centro y la longitud de los ejes de la elipse se pueden determinar de la siguiente manera:

$$Ax^2 + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (\text{A1.2})$$

$$A\left(x + \frac{D}{2A}\right)^2 - \frac{D^2}{4A} + C\left(y + \frac{E}{2C}\right)^2 - \frac{E^2}{4C} + F = 0 \quad (\text{A1.3})$$

$$\frac{\left(x + \frac{D}{2A}\right)^2}{\frac{1}{A}} + \frac{\left(y + \frac{E}{2C}\right)^2}{\frac{1}{C}} = \frac{D^2}{4A} + \frac{E^2}{4C} - F \quad (\text{A1.4})$$

$$\frac{\left(x + \frac{D}{2A}\right)^2}{\left(\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}\right)} + \frac{\left(y + \frac{E}{2C}\right)^2}{\left(\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}\right)} = 1 \quad (\text{A1.5})$$

Por lo tanto la elipse está centrada en el punto:

$$(x_c, y_c) = \left(-\frac{D}{2A}, -\frac{E}{2C}\right) \quad (\text{A1.6})$$

El semieje mayor, a , el semieje menor, b , y la excentricidad, e , vienen dadas por:

$$a = \max \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}\right)}, \sqrt{\left(\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}\right)} \right] \quad (\text{A1.7})$$

$$b = \min \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}\right)}, \sqrt{\left(\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}\right)} \right] \quad (\text{A1.8})$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (\text{A1.9})$$

En el caso de que B sea diferente de cero en (A1.1), reorientaremos la elipse haciendo una rotación del ángulo $-\theta$ (ángulo entre el eje mayor con el horizontal) para establecer los ejes de la elipse paralelos a los ejes de coordenadas. Las nuevas coordenadas (x', y') son:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (\text{A1.10})$$

Ahora la elipse se puede expresar como:

$$\begin{aligned} & A(x \cos \theta + y \sin \theta)^2 + B(x \cos \theta + y \sin \theta)(-x \sin \theta + y \cos \theta) + \\ & C(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2 + D(x \cos \theta + y \sin \theta) + E(-x \sin \theta + y \cos \theta) + F = 0 \end{aligned} \quad (\text{A1.11})$$

Agrupando términos tenemos:

$$A'x^2 + B'xy + C'y^2 + D'x + E'y + F' = 0 \quad (\text{A1.12})$$

con:

$$\begin{aligned} A' &= A \cos^2 \theta + C \sin^2 \theta - B \sin \theta \cos \theta \\ B' &= 2(A - C) \sin \theta \cos \theta + B \cos^2 \theta - B \sin^2 \theta \\ C' &= A \sin^2 \theta + C \cos^2 \theta + B \sin \theta \cos \theta \\ D' &= D \cos \theta - E \sin \theta \\ E' &= D \sin \theta + E \cos \theta \\ F' &= F \end{aligned} \quad (\text{A1.13})$$

Los ejes principales de la elipse deber ser paralelos a los ejes cartesianos, por lo que B' debe ser cero. A partir de esta condición ($B' = 0$) el ángulo resultante será:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{B}{C-A}\right) \quad (\text{A1.14})$$

Ahora, de los resultados de la elipse, podemos obtener la posición del centro y la longitud de los ejes aplicando las ecuaciones (A1.7), (A1.8) y (A1.9) con los parámetros en (A1.13).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Anexo 2 Operaciones morfológicas

Cuando se realiza un procesado de imágenes, se aplican diferentes operaciones morfológicas que nos ayudan a detectar y mejorar las condiciones del objeto que queremos aislar de la imagen, para su posterior análisis y para la obtención de sus características principales.

Generalmente, cuando se pretende aislar un objeto de una imagen de su entorno, se utiliza uno de los métodos más importantes de la segmentación, la *umbralización*. El objetivo de esta operación es convertir una imagen en escala de grises en una nueva con sólo dos niveles, de manera que el objeto de interés queda aislado del fondo. Esto se consigue, eligiendo un valor de la intensidad de la imagen (valor umbral) de manera que todo lo que tenga un valor superior a ese valor umbral, toma el valor 1 y lo que tenga un valor inferior toma valor 0.

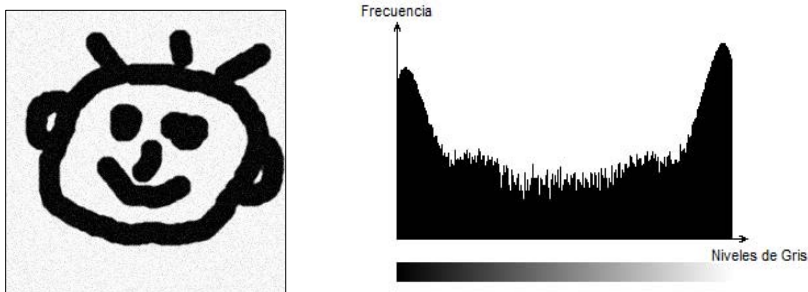


Figura A2.1 Imagen original y su correspondiente histograma.

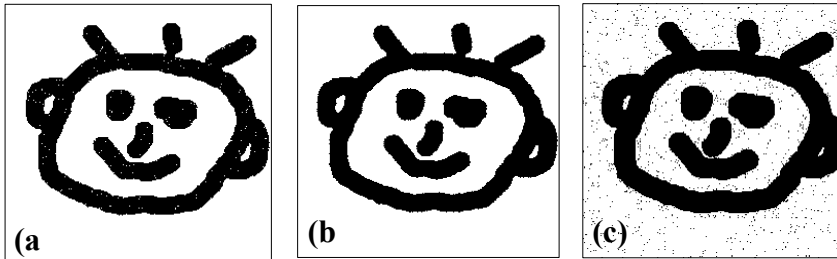


Figura A2.2 Umbralización con valor umbral de 30(a), 52(b) y 230(c).

http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_del_valor_umbral

Las operaciones básicas de la morfología de las imágenes en escala de grises son la erosión \ominus y la dilatación \oplus [Serra,1983]. Para una imagen F con un elemento estructural B se pueden definir estas operaciones como:

La *erosión* (\ominus) son los píxeles pertenecientes a la imagen F que contienen al centro del elemento estructural B . En caso contrario, los píxeles que no contengan al elemento estructural se eliminan.

En el ejemplo de la figura A2.3, podemos ver la erosión del cuadrado azul oscuro por un elemento estructural circular. Como resultado se reduce el tamaño obteniendo el cuadrado azul claro. Por tanto, este operador actúa como un filtro de mínima, con la consiguiente reducción del tamaño del objeto por la pérdida de píxeles marginales. La erosión se define como:

$$F \ominus B \quad (A2.1)$$

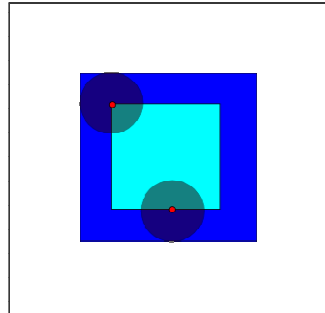


Figura A2.3 Erosión del cuadrado azul oscuro por un elemento estructural circular. Como resultado se obtienen el cuadrado azul claro.

(http://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_matem%C3%A1tica)

La *dilatación* (\oplus) es un operador que actúa como un filtro de máxima aumentando el tamaño del objeto, añadiendo los puntos del fondo que están en contacto con el borde del objeto que queremos aislar. En la figura A2.4, se muestra la dilatación del cuadrado azul oscuro por un elemento estructural circular, obteniendo como resultado el cuadrado azul claro. La dilatación se define como:

$$F \oplus B \quad (A2.2)$$

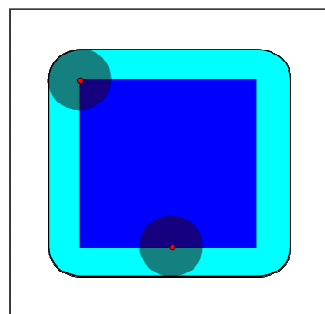


Figura A2.4 Dilatación del cuadrado azul oscuro por un elemento estructural circular. Como resultado se obtiene el cuadrado azul claro.

(http://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_matem%C3%A1tica)

Mediante la combinación de las dos operaciones anteriores podemos obtener la *apertura* (“*opening*”) y el *cierre* (“*closing*”).

La *apertura* es una combinación de una erosión seguida de una dilatación. Elimina las zonas por las que el elemento estructural B no puede pasar, de manera que redondea los bordes y alisa contornos (figura A2.5). Este operador se puede definir como:

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B \quad (\text{A2.3})$$

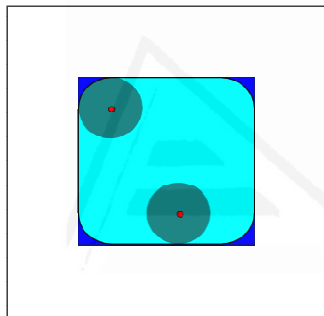


Figura A2.5. Apertura del cuadrado azul oscuro obteniendo como resultado el cuadrado azul claro con las esquinas redondeadas.

(http://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_matem%C3%A1tica)

Por otra parte, el operador de *cierre* es una combinación de una dilatación seguida de una erosión. Dicho operador, rellena pequeños agujeros, conecta objetos vecinos, teniendo en cuenta que el elemento estructural al contrario que en la apertura va por fuera del objeto y no por dentro. Este operador viene definido por:

$$F \cdot B = (F \oplus B) \ominus B \quad (\text{A2.4})$$

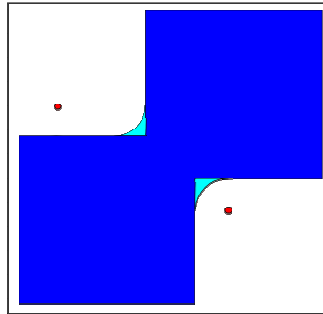


Figura A2.6 Cierre del área azul oscura, mediante un elemento estructural circular, obteniendo como resultado las áreas de color azul claro.

(http://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_matem%C3%A1tica)

Además, podemos utilizar las operaciones “*opening top-hat*” y “*closing top-hat*” que se definen como:

$$\text{OTH}_{FB} = (F - F \circ B) \quad (\text{A2.5})$$

$$\text{CTH}_{FB} = (F \cdot B - F) \quad (\text{A2.6})$$

Estas operaciones tienen características de un filtro pasa alta y pueden detectar crestas o valles de una onda en una imagen.

Por último, se emplean las funciones de *detección de bordes*. Dichas funciones se utilizan con el objetivo de identificar los puntos de una imagen digital en las que el brillo de la imagen cambia drásticamente o tiene discontinuidades, que es lo que se conoce como borde.

Publicación 1

Pupil detection and tracking for analysis of fixational eye micromovements

Optik, **123** (11-15), 2012.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Pupil detection and tracking for analysis of fixational eye micromovements

Ana B. Roig^a, Marta Morales^b, Julian Espinosa^a, Jorge Perez^a, David Mas^{a,*}, Carlos Illueca^a

^a Dep. Optica, University of Alicante, PO Box 99, 03080 Alicante, Spain

^b Dep. Fisica Aplicada, University of Alicante, PO Box 99, 03080 Alicante, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 May 2010

Accepted 15 October 2010

Keywords:

Eye moments
target tracking
Microsaccades
ocular drifts
image processing

ABSTRACT

Even with fixed gaze, the human eye is under steady motion (tremor microsaccades and drifts). Detection of these movements requires of invasive techniques or expensive devices with sophisticated detection methods. In this paper we present a technique for pupil segmentation and contour analysis which will provide valuable information about fixational eye movements. The method is based on fitting an ellipse to the pupil contour. Pupillary hippus, microsaccades and drifts are obtained as well as cyclotorsional movements. The method is simple and the experimental requirements are easily available since just a biomicroscope and a digital videocamera are required.

© 2011 Elsevier GmbH. All rights reserved.

1. Introduction

The human eye is constantly moving even when it is maintaining a stable fixation point. Usually, these movements are too small for being appreciated without specific instrumentation but they play a fundamental role in eye physiology and, unfortunately, increase the complexity of the eye with respect to conventional optical systems [1].

Stable images on the retina rapidly saturate the photoreceptors and fade. The visual system needs of constant stimulation to which it adapts. These constant changes are achieved by fixational micromovements which consists of microtremors, drifts and microsaccades [2–5]. Microtremors are constant high frequency (80 Hz) low amplitude (120–2500 nm) eye tremors. Their role in vision is to avoid image fading due to saturation of retinal photoreceptors. Drifts are smooth pursuit movements associated to the instability of the oculomotor system and microsaccades are sudden jerk like movements of the eye of amplitude varying from 2 to 120 arcmin and around 25 ms of duration. Their possible role is to correct displacements in eye position produced by drifts.

The equipment for eye movement detection has significantly advanced in recent decades from rudimentary and invasive methods, like the electrooculogram [6] or scleral search coils [7–9], to non-invasive systems as the video-oculography [10].

The principle of the “search coil” technique is based on the induction of an electrical field on as small coil [7]. Although it is highly invasive, this method is actually considered the “gold stan-

ard” for eye movement measurements. The induction coil is inside a flexible ring of silicone rubber which adheres to the limbus of the human eye concentric with the cornea, through a contact lens [8,11]. The head of the subject is placed inside magnetic fields. Induced voltages in the coil provide data about horizontal and vertical positions of the eyes, as well as cyclotorsions.

Pupil detection has been used for accurate calculation of eye orientation [12]. It is usually assumed that the optical axis (the line through the pupil center and the eye rotation center) coincides with the direction of gaze. Thus, accurate determination of pupil center is crucial for precise eye tracking [13]. Pupil center is usually determined by detecting its border and assuming a particular geometrical shape. The simplest approximation consists on assuming that the pupil is rotationally symmetric [14], however elliptical shape seems to be a better choice [13].

The determination of the pupil shape parameters is also of great interest for non-invasive early diagnosis of the central nervous system response to environmental stimuli [15]. Pupil geometrical features such as area, semiaxis, centroid and orientation can be obtained by image segmentation.

The aim of this work is to present a simple non-invasive optical method for detecting and measuring fixational micromovements. A video camera has been attached to a biomicroscope and the anterior segment of the eye has been captured. The contour of the pupil has been detected and fitted to an ellipse. Through its geometrical parameters we have studied the spontaneous pupil dilation, microsaccades and drifts and also cyclotorsions.

The presented technique is simple and rather inexpensive since the experimental requirements are available in all optometric and ophthalmic faculties and can be easily developed by a graduate student. The principles here explained can be also extended to the

* Corresponding author.

E-mail address: david.mas@ua.es (D. Mas).



Fig. 1. Slit-lamp and digital video camera used to capture the images of frontal corneal.

analysis of more complex effects, either using a high speed camera or adapting the setup for binocular observation.

2. Subjects and methods

Images of the frontal cornea were obtained by illuminating the eye with a Haag-Street style slit-lamp (SL-990). Video sequences were captured with a digital video camera working at 63 fps and a spatial resolution of 800×560 px attached to the lamp (see Fig. 1). Diffused illumination was used to obtain uniform illumination on the whole cornea and a red filter was additionally used to avoid discomfort to the subject.

Five healthy subjects (3 women, 2 men, aged 22–40) among the staff of the Optics Department of the University of Alicante were asked to participate in this experience. We adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki during this study. All participants were informed about the nature and purpose of the study and all of them provided informed consent.

Three different sequences were registered for each subject's right eye with the left eye occluded. Measurements were taken in total darkness to avoid reflections and discomfort to the subjects. During the measurements a red LED was used as a fixation point. Residual head movements were restrained by the use of a dental bite bar and firmly fastening the head to the chinrest frame. Finally, the chinrest structure was reinforced with lateral supports, as can be appreciated in Fig. 1. In order to further minimize the head movements the subjects were asked to not breathe during the measuring time, which lasted 10 s.

Obtained images are analyzed off-line using MATLAB. Edge detection algorithms were applied to determine the pupil contour which is fitted to an ellipse. Position of the center of the ellipse gives information about slow (drifts) and sudden eye movements (microsaccades), while rotation of the axes describes spontaneous cyclo-torsional movements. Furthermore, variation of the pupil area provides information about spontaneous changes in pupil aperture, known as "hippus" [16].

3. Image processing algorithms

The method here applied consists of detecting the pupil contour in all frames and calculating the best ellipse fitting to it. First, a threshold value is selected for hard clipping of the image thus obtaining a black region of interest which corresponds to the pupil. A morphological closing operation is then performed in order to

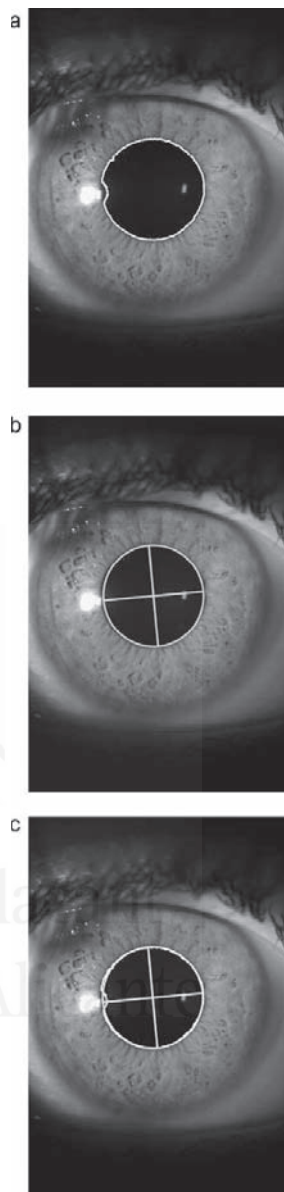


Fig. 2. (a) Image representing the pupil contour in the presence of sparkle, (b) adjustment of contour data, and (c) image representing the pupil contour and adjustment.

eliminate noise in the image that could distort the pupil contour [17].

Edge detection determines the border of the black area and thus traces the pupil contour. In many occasions, reflections from the illumination system may appear inside the region of interest (see Fig. 2). Isolated reflections inside the pupil area will not disturb the detection process but those close to the border may interfere in the obtained contour. In order to eliminate this interference the size of the sparkle is delimited by selecting all connected saturated pixels in the image. If the area so obtained intersects with the pupil

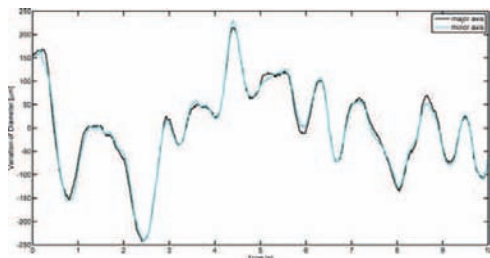


Fig. 3. Variation of the pupil diameter for the subject AR.

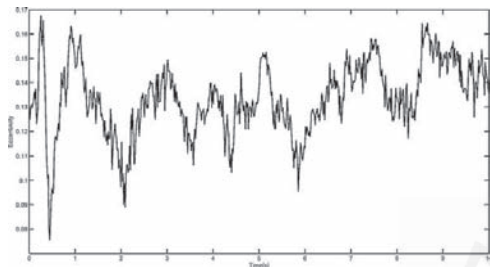


Fig. 4. Eccentricity of the ellipse for the same subject (subject AR).

contour these data are removed from the set to be fitted to an ellipse. The excluded data are a small percentage of the points delimiting the pupil and they not affect to the goodness of the fit.

The coordinates (x, y) of the pixels forming the border of the pupil are fitted to the ellipse general equation:

$$A \cdot x^2 + B \cdot xy + C \cdot y^2 + D \cdot x + E \cdot y + F = 0 \tag{1}$$

In Annex 1 we show the obtention of the geometrical parameters of the ellipse (semi-axes, center and orientation) from the polynomial parameters in expression (1). The MATLAB procedure for such adjustment can be found in [18].

The correspondence between pixels and real distances is obtained by capturing a pattern with known size. Thus, we obtained a resolution of 40 px/mm, being the accuracy of the measurement of 2.5 μm . If we consider that the rotation center of the eye is situated at around 15 mm from the corneal apex [19] the angular resolution of the image is 10.5 $\text{px}/^\circ$.

4. Results

4.1. Pupil diameter

We have studied the spontaneous variations of the pupil diameter under constant illumination or hippus [16,20]. In Fig. 3 we show the variation of the major and minor axes with respect their mean values for a typical observer. Coincidence of variations in both axis shows that there is not asymmetric deformation of the pupil during is activity. In Fig. 4, we show the eccentricity of the ellipse for the

Table 1
Pupil area and the eccentricity obtained for all subjects.

Subject	Area (mm^2)	Eccentricity
AR	18.55 ± 1.18	0.14 ± 0.01
MM	8.70 ± 0.47	0.20 ± 0.02
JE	12.13 ± 0.49	0.27 ± 0.01
DM	10.58 ± 0.11	0.23 ± 0.03
BD	8.04 ± 0.37	0.24 ± 0.01

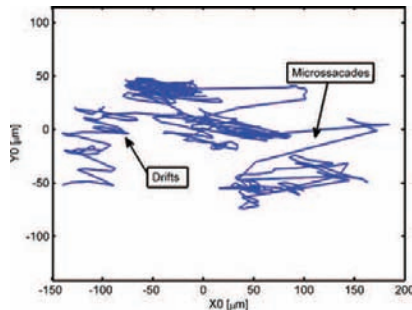


Fig. 5. Representation of the gaze tracking where can see normal movements (drifts and microsaccades).

same subject (subject AR). From both Figs. 3 and 4 we can appreciate that, in general the pupil maintains its shape throughout the measurement time. In Table 1 we show the eccentricity obtained for all the observers, together with the pupil area variation. We can see there that variation of the pupil area due to hippus is around 5% while variation in eccentricity is around 8%. Results of area variation are in agreement with the literature [21] which reports area oscillations larger than 3%. Although pupil shape is assumed to be elliptic [15], no information about average eccentricity and its variation was found, since vast majority of pupilometers used in ophthalmology assume circular pupils for healthy subjects. A statistical study with a larger number of subjects will determine the mean values and variation of the pupil eccentricity.

4.2. Eye movements

Eye movement has been analyzed by tracking the center of the ellipse (X_0, Y_0) . Since variation in both minor and major axis is equivalent, displacement of the pupil center may not correspond to shape variations. It has been described in the bibliography [22] that pupil can displace depending whether the eye is looking to close or far objects. In this case, since the accommodation distance is fixed, we can assume that registered displacements are due to eye movements.

In Fig. 5 we show the gaze tracking of one typical subject (subject JE). We would like to underline that observed dynamics correspond to normal movements (drifts and microsaccades) while the sight is fixed on a target. Microsaccades can be recognized as long and sudden movements of the eye in the horizontal direction, while drifts are smooth movements that happen between two successive microsaccades [23,24].

Separate representation of vertical and horizontal components provides better insight about the eye movement structure. In Fig. 6 we represent those components after removing a linear trend. Microsaccades can be clearly identified there as sudden jumps. These movements are considered small saccades that occur during fixation to keep the image on the fovea and/or to correct displacements in eye position produced by drifts. Their duration is of about 25 ms (1–2 frames) and occur 1 or 2 per second along a straight path mainly in the horizontal direction [12,23–26] as can be seen from the figure. Amplitude of microsaccades can vary between 1 arcmin to 1° . In our case we roughly calculate a mean value of 30 arcmin. In some measurements and for some subjects appeared peaks of more than 5° which probably represent big saccades due to loss of fixation. In any case, the estimation has been done by hand and an automatic procedure has to be design in order to recognize and properly describe microsaccadic movements.

As we described above, drifts can be seen as a low frequency variation in the position of the eye. Fine variations of the eye

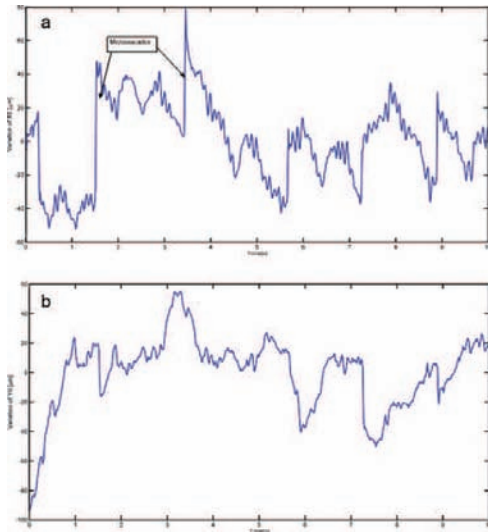


Fig. 6. (a) Representation of horizontal component for subject AR where micro-saccades can be clear identified and (b) representation of vertical component for the same subject.

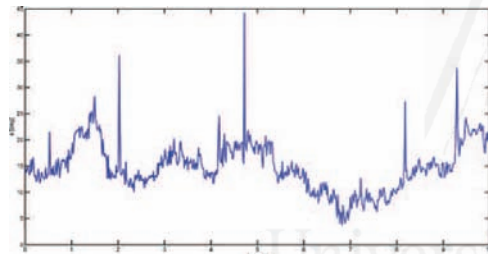


Fig. 7. Representation the ellipse orientation for the subject MM.

position around the drift path may come from eye pulsations or under sampled tremors, which have a frequency around 100Hz. Our system samples at 63 Hz, so movements above 32 Hz will not be correctly registered.

The specific values of the ellipse orientation, which can be obtained from expression (A.14) are not an important parameter, but it is their variations, since they will inform about cyclotorsional eye movements. In Fig. 7 we show this parameter for the subject here analyzed. In Table 2 we show the mean \pm SD values obtained for each subject. By considering the standard deviation as a measure of variation, we can see in the table that values differ very much between subjects. Values found in the literature are around 2° [27] although cyclotorsions of 9.5° during surgical interventions have been reported [28]. For some of the observers, values are close to those reported, while for others, discrepancy is really high. The

Table 2
Angular oscillation for all subjects.

Subject	Angle ($^\circ$)
AR	-11.752 ± 14.068
MM	9.604 ± 7.904
JE	2.983 ± 21.031
DM	-0.507 ± 3.646
BD	-9.760 ± 3.194

method here developed is very dependant on accurate determination of geometrical parameters in the ellipse, and errors in their determination can distort results from indirect measurements like the angle. Other source of error may come from the loss of fixation. Change of fixation point may also produce an adjustment of the binocular vergence and thus modify the angle of the ellipse. Unfortunately the method does not allow distinguishing between the different possibilities.

5. Conclusion

Applied method for detecting pupil contour allows tracking the fixational eye movements. With a simple setup and software application, we are able to detect small microsaccades and drift movements, as well as cyclotorsional movements. Microtremors are movements of very small amplitude and very high frequency so their detection is beyond the capabilities of our system.

Obtained results are in agreement with those found in the bibliography. Identification of microsaccades and drifts is clear, and it is also possible to detect pupilar hippus. Cyclotorsions are also detected but results are not clear and some improvement is needed.

Information reported here may be enough to reproduce the experiment by any postgraduate student. The setup can be also modified in order to analyze binocular correlations, pupil movement associated to accommodation or analyze whether these movements respond to any clear pattern on they are chaotic. By adapting the illumination system to have more light, one could even increase the temporal resolution of the camera and analyze eye dynamics before and after microsaccade episodes or detect and analyze microtremors.

Acknowledgement

This work has been supported by the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovacion through the project FIS2009-05639-E.

Annex 1.

An ellipse is determined by

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \tag{A.1}$$

First, we study the ellipse's orientation relative to coordinate axes. The coefficient B equal to zero indicates that the ellipse's axes are parallel to the coordinate axes. In this case, if $C > A$ the ellipse presents the major axis parallel to the horizontal one. On the contrary, major axis is parallel to the vertical one. The center position and the length of the axes of the ellipse can be determined as follows

$$Ax^2 + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \tag{A.2}$$

$$A\left(x + \frac{D}{2A}\right)^2 - \frac{D^2}{4A} + C\left(y + \frac{E}{2C}\right)^2 - \frac{E^2}{4C} + F = 0 \tag{A.3}$$

$$\frac{(x + (D/(2A)))^2}{1/A} + \frac{(y + (E/(2C)))^2}{1/C} = \frac{D^2}{4A} + \frac{E^2}{4C} - F \tag{A.4}$$

$$\frac{(x + (D/(2A)))^2}{((D^2/(4A^2)) + (E^2/(4AC)) - (F/A))} + \frac{(y + (E/(2C)))^2}{((D^2/(4AC)) + (E^2/(4C^2)) - (F/C))} = 1 \tag{A.5}$$

Thus the ellipse is centered in the point

$$(x_c, y_c) = \left(-\frac{D}{2A}, -\frac{E}{2C}\right) \tag{A.6}$$

Major semiaxis, a , minor semiaxis, b , and the eccentricity, e , are given by

$$a = \max \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}\right)}, \sqrt{\left(\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}\right)} \right] \tag{A.7}$$

$$b = \min \left[\sqrt{\left(\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}\right)}, \sqrt{\left(\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}\right)} \right] \quad (\text{A.8})$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (\text{A.9})$$

In case of being B different to zero in (1), we redirect the ellipse by making a rotation of angle $-\theta$ (angle between the major axis with the horizontal one) in order to set ellipse's axes parallel to coordinate ones. The new coordinates (x', y') are

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Now, the ellipse can be expressed as

$$\begin{aligned} A(x \cos \theta + y \sin \theta)^2 + B(x \cos \theta + y \sin \theta)(-x \sin \theta + y \cos \theta) \\ + C(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2 + D(x \cos \theta + y \sin \theta) \\ + E(-x \sin \theta + y \cos \theta) + F = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Grouping terms we get

$$A'x^2 + B'xy + C'y^2 + D'x + E'y + F' = 0 \quad (\text{A.12})$$

with

$$\begin{aligned} A' &= A \cos^2 \theta + C \sin^2 \theta - B \sin \theta \cos \theta \\ B' &= 2(A - C) \sin \theta \cos \theta + B \cos^2 \theta - B \sin^2 \theta \\ C' &= A \sin^2 \theta + C \cos^2 \theta + B \sin \theta \cos \theta \\ D' &= D \cos \theta - E \sin \theta \\ E' &= D \sin \theta + E \cos \theta \\ F' &= F \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

The principal axes of this ellipse must be parallel to the Cartesian axes, so B' must be zero. From this condition ($B' = 0$) the angle results

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{B}{C - A} \right) \quad (\text{A.14})$$

Now, from the resulting ellipse, we can obtain the center position and the length of the axes applying Eqs. (A.7)–(A.9) with the parameters in (A.13).

References

- [1] H. Kasprzak, D.R. Iskander, T. Bajraszewski, A. Kowalczyk, W. Nowak-Szczepanowska, High accuracy measurements of spectral characteristics of movement of the eye elements, *Opt. Pura Apl.* 40 (2007) 7–11.
- [2] R.W. Ditchburn, J.A. Foley-Fisher, Assembled data on eyemovements, *Opt. Acta* 14 (1967) 113–118.
- [3] A. Yarbus, *Eye Movements and Vision*, Plenum Press, New York, 1967.
- [4] R.H.S. Carpenter, *Movements of the Eyes*, 2nd ed., Pion, London, 1988.
- [5] S. Martinez-Conde, S.L. Macknik, D.H. Hubel, The role of fixational eye movements in visual perception, *Nat. Rev. Neurosci.* 5 (2004) 229–240.
- [6] E. Marg, Development of electro-oculography; standing potential of the eye in registration of eye movement, *AMA Arch. Ophthalmol.* 45 (1951) 169–185.
- [7] D.A. Robinson, A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 10 (1963) 137–145.
- [8] H. Collewijn, F. Van der Mark, T.C. Jansen, Precise recording of human eye movements, *Vision Res.* 14 (1975) 447–450.
- [9] L. Ferman, H. Collewijn, T.C. Jansen, A.V. Van den Berg, Human gaze stability in the horizontal, vertical and torsional direction during voluntary head movements, evaluated with a three-dimensional scleral induction coil technique, *Vision Res.* 27 (1987) 811–828.
- [10] H. Scherer, W. Teiwes, A.H. Clarke, Measuring three dimensions of eye movement in dynamic situations by means of videoolography, *Acta Otolaryngol.* 111 (1991) 182–187.
- [11] R.T. Kenyon, A soft contact lens search coil for measuring eye movements, *Vision Res.* 25 (1985) 1629–1633.
- [12] J.R. Liang, S. Moshel, A.Z. Zivotofsky, A. Caspi, R. Engbert, R. Kliegl, S. Havlin, Scaling of horizontal and vertical fixational eye movements, *Am. Phys. Soc.* 71 (2005) 1–6.
- [13] D. Zhu, S.T. Moore, T. Raphan, Robust pupil detection using a curvature algorithm, *Comput. Methods Programs Biomed.* 59 (1999) 145–157.
- [14] D.R. Iskander, S. Mioschek, M. Trunk, W. Werth, Detecting eyes in digital images, in: *Proceedings of the Seventh International Symposium Signal Processing and its Applications*, vol. II, 2003, pp. 21–24.
- [15] A. De Santis, D. Iacovello, Optimal segmentation of pupillometric images for estimating pupil shape parameters, *Comput. Methods Programs Biomed.* 84 (2006) 174–187.
- [16] H. Bouma, L.C.J. Baghij, Hippus of the pupil: periods of slow oscillations of unknown origin, *Vision Res.* 11 (1971) 1345–1351.
- [17] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, Inc., Orlando, FL, 1983.
- [18] O. Gal, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fitellipse> (last seen in 04.27.2010).
- [19] G.A. Fry, The center of rotation of the eye, *Am. J. Optom. Arch. Am. Acad. Optom.* 39 (1962) 581–595.
- [20] H.J. Wyatt, The form of the human pupil, *Vision Res.* 35 (1995) 2021–2036.
- [21] S.Z. Li (Ed.), *Encyclopedia of Biometrics*, Springer, New York, 2009.
- [22] L.S. Gray, B. Winn, B. Gilmartin, Accomodative microfluctuations and pupil diameter, *Vision Res.* 33 (15) (1993) 2083–2090.
- [23] J.R. Charlier, M. Behague, C. Buquet, Shift of the pupil center with pupil constriction, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 35 (4) (1994) 118.
- [24] F. Censi, G. Calcagnini, F. De Pasquale, S. Lino, S. Cerutti, Baroreceptor-sensitive fluctuations of human pupil diameter, *Comput. Cardiol.* 26 (1999) 233–236.
- [25] G. Calcagnini, P. Giovannelli, F. Censi, P. Bartolini, V. Barbaro, Baroreceptor-sensitive fluctuations of heart rate and pupil diameter, in: *Proc. 23rd Annual EMBS Int. Conf.*, 25–28, Istanbul, Turkey, 2001, pp. 600–603.
- [26] D.R. Iskander, M.J. Collins, S. Mioschek, M. Trunk, Autonomic pupillometry from digital images, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51 (9) (2004) 1132–1137.
- [27] J. Porter, G. Yoon, S. MacRae, G. Pan, T. Twietmeyer, I.G. Cox, D.R. Williams, Surgeon offsets and dynamic eye movements in laser refractive surgery, *J. Cataract Refract. Surg.* 31 (2005) 2058–2066.
- [28] D.A. Chernyak, Cyclotorsional eye motion occurring between wavefront measurement and refractive surgery, *J. Cataract Refract. Surg.* 30 (2004) 633–639.

Publicación 2

Measurement of wide frequency range structural microvibrations with pocket digital camera and sub-pixel techniques

Appl. Optics. **51** (2664-2671), 2012.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Measurement of wide frequency range structural microvibrations with a pocket digital camera and sub-pixel techniques

David Mas,^{1,*} Julian Espinosa,¹ Ana B. Roig,¹ Belen Ferrer,²
Jorge Perez,¹ and Carlos Illueca¹

¹Inst. Física Aplicada a las Ciencias y Tecnologías, University of Alicante, P.O. Box 99, 03080, Alicante, Spain

²Dep. Ing. Construcción, University of Alicante, P.O. Box 99, 03080, Alicante, Spain

*Corresponding author: david.mas@ua.es

Received 14 December 2011; revised 23 February 2012; accepted 24 February 2012;
posted 1 March 2012 (Doc. ID 159966); published 10 May 2012

Analysis of vibrations and displacements is a hot topic in structural engineering. Although there is a wide variety of methods for vibration analysis, direct measurement of displacements in the mid and high frequency range is not well solved and accurate devices tend to be very expensive. Low-cost systems can be achieved by applying adequate image processing algorithms. In this paper, we propose the use of a commercial pocket digital camera, which is able to register more than 420 frames per second (fps) at low resolution, for accurate measuring of small vibrations and displacements. The method is based on tracking elliptical targets with sub-pixel accuracy. Our proposal is demonstrated at a 10 m distance with a spatial resolution of 0.15 mm. A practical application over a simple structure is given, and the main parameters of an attenuated movement of a steel column after an impulsive impact are determined with a spatial accuracy of 4 μm . © 2012 Optical Society of America

OCIS codes: 100.2000, 100.4999, 040.7290.

1. Introduction

Measurement of vibrations and displacements of structures under dynamic excitations or impacts is an important topic in structural engineering [1]. Movement of structures is related to the strains and stresses in the structure; therefore, to its security level [2]. Moreover, modal analysis and damping time provide important information about mechanical behavior of the different structures.

Despite the importance of displacement measurements, there has not been any good solutions found for all of the frequency range. For low frequencies (~ 80 Hz), linear variable differential transformers provide direct value of the displacement. However,

they must be fixed to the structure and anchored to an external structure, which must be stable enough to avoid noise in the sensor measurement. These arrangements are not always possible due to security reasons or terrain constraints; therefore, non-contact methods are preferred.

Accelerometers are often used to analyse the dynamics of a vibrating body. Although they measure by direct contact, their mass is small enough not to modify the natural vibration of the structure they are measuring. Their dynamic range and acquisition rate can be very high, so they are adequate for structural modal analysis. Nevertheless, double integration of the signal is not always possible and thus, absolute information about displacement cannot be easily obtained [3]. Laser vibrometers and radar interferometers [4–7] provide a good solution for measuring displacements in all range of frequencies.

1559-128X/12/142664-08\$15.00/0
© 2012 Optical Society of America

Unfortunately, these devices tend to be very expensive and are not cost-effective for many applications. Additionally, Doppler based technologies measure velocities instead of direct displacements so numerical integration is, again, needed.

Vision based systems have emerged as a good alternative for measuring real displacements in structures [8]. However, limitations in temporal and spatial resolution make them inapplicable to many problems of great interest like analysis of vibrations under accidental actions [9], where frequencies in the mid-range (50–500 Hz) are of utmost importance.

To the best of our knowledge, no paper in the literature describes image based methods for measuring submillimetric oscillations at that range of frequencies. Recently, some of the authors of this paper presented a novel technique for directly measuring the displacement of a vibrating column with a high-end scientific high speed camera (X-PRI from AOS Technologies AG) [9]. The method showed to be robust and capable of measuring all parameters of the main vibration mode, i.e. amplitude, frequency and damping constant. Images were acquired at 1000 fps so the method allows measuring direct displacement of the structure in the low and mid-range frequencies. Although the presented optical setup is simpler and cheaper than traditional systems [4–7], the achieved spatial resolution was relatively low. Additionally, scientific high-resolution fast cameras cannot always be considered as being low-cost devices and their availability is not widespread.

Vision based systems with high speed cameras appear as a good solution provided that the problem of limited spatial resolution can be solved. In this paper, we propose a method for object tracking with sub-pixel accuracy that solves this problem. Additionally, the method can be implemented with low-cost devices; thus, being a close to optimal solution to the problem of direct measuring displacements in the mid-frequency range.

The main problem of using digital cameras to quantitative measure small displacements in structures is due to hardware constraints. Resolution of the sensor is usually linked to the processing speed. Actual image systems have severe limitations to simultaneously capture, process and store large amount of data. This fact impedes both very high temporal and spatial resolution. In the case of structural analysis, natural frequencies of civil structures are typically below 100 Hz. Although it is not a very high rate, cameras working slower than 250 fps are considered low-end; thus, their performance is limited, typically offering VGA resolution or even lower, [10] which is not accurate enough to measure small amplitude vibrations.

Depending on the particular application, improving the resolution of the camera may be uneconomical or even impractical. However, one can take advantage of some “a priori” information about the system and, afterwards, use image processing tech-

niques to increase the performance of the system. Thus, software methods may be used to compensate limitations in the hardware.

Sub-pixel techniques allow increasing the nominal resolution of the image sensors. Basically, these techniques consist of capturing and digitally post-processing scenes containing targets of known shape. These targets are recognized and extracted from the scene. Then, through smart interpolation of their different features, it is possible to decrease the uncertainty in the object position, even below the basic pixel unit. Therefore, a fully automated tracking method with sub-pixel accuracy includes two basic steps (1) target recognition, and (2) location through features extraction [11,12]. From both tasks, target recognition is the most complicated since it requires of a proper analysis and segmentation of the image. This process can be simplified and accelerated by using specific targets that are easy to recognize [13]. Among all possible targets elliptical objects including circles are usually preferred since its shape is preserved under lateral shifts and rotations.

The first step of all algorithms for object location in the scene consists of target isolation from the background image that allows obtaining a distinguishable “blob” object. This step is usually performed through binary thresholding, hard-clipping, or edge extraction. Once the target is isolated several techniques can be applied for sub-pixel location of the blob [11,14,15]. Among them those based on centroid calculation seem to be the most accurate and reliable of methods [16,17].

Centroid detection algorithms provide good results when the target illumination is symmetric. However, their performance can be seriously affected in presence of irregular illumination and noise. Other methods based on image intensity, like those based on image correlation or template matching, may be affected by similar problems [18]. These drawbacks become evident in the particular characteristics of images from fast cameras. Under constant illumination, an increase in the frame rate imposes low exposure levels, so captured images suffer from low contrast and high noise level.

Here we are interested in tracking vibrations in civil structures [9], so all measurements are taken outdoors. This fact imposes serious restrictions on the scene illumination. The tracked target may receive direct daylight, which is unstable due to the presence of clouds, changing angle of the sun, and uncontrolled presence of shadows. Additionally, the camera cannot always be situated in an optimal position due to security or terrain restrictions. All these conditions limit the quality of the image, and impose severe restrictions on the target selection.

Contour detection methods for object tracking are a reliable and robust alternative to centroid-based methods. Under ideal conditions their sub-pixel detection capability is not as good as these last techniques [11,12] since only the target borders are used and the inner structure is neglected. However,

contour based methods are more robust since they are not as affected by noise in the image. Additionally, the detected contour can be fitted to a known geometrical shape, which provides additional information along with the target location. In our case, we have selected a target composed by a black elliptical contour line over a white background. Highly-contrasted binary targets permit the application's very aggressive image processing algorithms, such as local binarization, thus correcting changes in light incidence angle or irregular illumination over the scene.

The novelty of our proposal is to demonstrate the possibility of direct measurement of structural micro-vibrations in a wide frequency range. The method here presented is highly cost-effective since it uses a commercial digital pocket camera. In particular, we use a standard Casio Exilim EX-FH20, which is able to capture high speed video. This camera is available in the market for less than \$400 and is able to acquire images at 240, 420, and 1000 fps by reducing the spatial resolution of the camera from 3456×2592 px (still mode) to 480×360 , 224×168 and 224×54 px, respectively. The use of such low-end technology requires intensive image processing, but results are accurate and reliable, avoiding the need of numerical integration of the signal. An additional advantage of the method is that it allows direct observation of the phenomenon permitting a better interpretation of the result.

The paper is developed as follows. In Section 2, we describe the methodology and define the main variables. In Section 3, the accuracy of the method is demonstrated through numerical analysis. A simple lab experiment is presented in Section 4 in order to prove the method. The performance of the technique outdoors is checked in Section 5 where we use the measure of the vibrations of a steel column after an impulsive impact. Main parameters of the vibration are calculated and compared with results obtained through dynamic analysis made by a Finite Element Model (FEM). Finally, in Section 6, the main conclusions are outlined.

2. Method

Sub-pixel methods are widely known and academic and commercial applications can be easily found. Usually, these methods are based on the numerical calculation of the centroid coordinates of an object by using its complete structure or its contour. In our case, we are only interested in this last method, but restricted to objects of known shape. Hence, the observed pixelated image can be fitted to the theoretical model which defines this shape and, therefore, the location accuracy is statistically increased (see Fig. 1).

Among all possible targets, the most appropriate are those which preserve the topology at all possible movements [5]. The simplest one which fulfills this characteristic is an ellipse with general equation

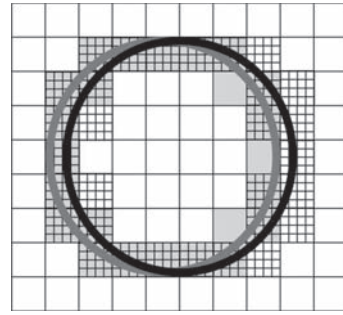


Fig. 1. Detection of a target (black line) is done by a set of pixels, here marked with a grid. A displacement of 1/2 pixel to the left (gray line) is detected by a change in some of the detection pixels, now painted in gray. Although the structure has not moved a whole pixel, the geometrical bindings imposed on the target allow tracing the new contour and obtaining the new position.

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0. \quad (1)$$

The coefficient B equal to zero indicates that the ellipse's axes are parallel to the coordinate axes. The center position (x_c, y_c) , and the long and short axes (a, b) can be determined as [19]:

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{-D}{2A}, \frac{-E}{2C} \right). \quad (2)$$

$$a = 2 \times \max \left[\sqrt{\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}}, \sqrt{\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}} \right]$$

$$b = 2 \times \min \left[\sqrt{\frac{D^2}{4A^2} + \frac{E^2}{4AC} - \frac{F}{A}}, \sqrt{\frac{D^2}{4AC} + \frac{E^2}{4C^2} - \frac{F}{C}} \right]. \quad (3)$$

In case of B being different to zero in (1), we position the ellipse by making a rotation of angle $(-\theta)$ (angle between the major axis with the horizontal one) in order to set ellipse's axes parallel to coordinate ones. In that case, the angle can be obtained through:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{B}{C-A} \right). \quad (4)$$

The center of the ellipse provides localization of the object inside the image plane. Orientation of the ellipse informs about in-plane rotations, whereas the axis lengths may both be associated to real changes in the ellipse shape (deformations) or provide information about rotations around an axis contained in the image plane. This kind of movements will be seen as a change in the perspective and, consequently, in the apparent eccentricity.

To proceed with the detection, the target is attached to the object under study and a video sequence is registered. The sequence is processed frame-by-frame. Convenient thresholding permits the isolation of the target contour and tracking is performed by fitting the extracted line to Eq. (1). In this work, we only focus our attention in tracking lateral shifts, i.e. detecting the ellipse center. Coming back to Fig. 1, the change in only one pixel changes the statistics of the whole set. Geometrical restrictions imposed by the Eq. 1 (the contour must remain an ellipse) induces small changes in the calculated center in Eq. (2) although the target displacement is smaller than one pixel, so we increased the nominal resolution of the sensor. According to previous works in [11], the resolution of this method is around 0.08 px.

3. Numerical Simulations

The accuracy of the method has been numerically tested before performing real experiments. To this end, we have applied the sub-pixel method on circular targets. A simple noise model has been introduced in the simulation in order to see how the performance is affected.

Low-end cameras, like the Casio here used, are not specialized, but compact automatic devices, which give little control over the recording parameters. Therefore, aside of limitations in spatial and temporal resolution, which can be conveniently addressed, the use of compact cameras presents other problems, which also may limit the performance of the detection method. These problems include focusing accuracy, high ISO-noise and video compression algorithms.

Inaccurate focusing and consequent image blurring causes the contour lines to be diffused and, after an image thresholding, it may results in lines thickening. After this, processing noise coming from low illumination appears as salt-and pepper and is randomly distributed through the image. Majority of this noise can be easily removed with a median filter or a morphological opening [20] and only those dots in contact with the target will remain. In this case, the problem can be reduced to a local thickening/thinning of the contour lines.

Video compression is the effect that most degrades the image. Typically, consumer cameras use AVI-JPEG compression algorithms in order to avoid excessive file sizes. Roughly speaking, this video compression algorithm consists of a quantization of the discrete cosine transform on predefined pixel blocks in an image. Each of the blocks is considered independently of the adjacent structures; thus, the final compressed image may have a tiled appearance. The main difference with the standard MPEG algorithm is that AVI-JPEG compression is done frame-by-frame so distortions are not propagated in time.

JPEG algorithm with very high compression rates may produce a strong distortion in complex images. Nevertheless, scenes used in our application just

contain a fine elliptical line with slow variations between frames. Thus, after compression, the line will appear broken and noise corrupted, but with a still clear recognizable shape. This tile-effect decreases the fitting accuracy since increases the dots dispersion.

The calculation of the target position and orientation is done by taking the position of each black pixel on the image and fitting the whole set to an analytical ellipse. Therefore, any pixel outside the theoretical line will contribute to the increase of the fitting error. In this sense, the effect of discontinuities of the line due to compression or increased line thickness should be considered as particular cases of a more general case of dots misplacement.

This noise effect has been modelled here by corrupting the coordinates of each dot by a uniformly distributed random noise distribution. Notice that the different situations above described (image blurring, ISO noise and JPEG corruption)—can be reduced to a problem of line thickness and their difference is just a question of dots density. In this sense, we believe that our noise model is accurate enough to determine the theoretical limits of our proposal.

Let us consider the coordinate of each pixel in the contour (x, y) . Following our model, these dots will be randomly shifted according to:

$$(x', y') = (x + \text{rnd}(w), y + \text{rnd}(w)), \quad (5)$$

where $\text{rnd}(w)$ generates a pseudorandom number in the interval $[-w/2, w/2]$ by following a uniform probability distribution.

The numerical simulations have been implemented as follows: different size targets consisting on circular contour of 1 px thickness have been implemented on a discrete mesh and then least square fitted to (1). The generating analytical function is then horizontally shifted 1 full pixel in steps of 0.005 px and the resulting contours are consecutively fitted to (1) to re-calculate the new center positions. The process is repeated for diameters from 10 px to 200 px and for different dispersion levels, according to Eq. (5). Absolute differences between the theoretical and estimated positions are calculated. For each diameter-cycle the positioning error distribution is obtained. The accuracy of the method is established in three times the standard deviation of the error distribution. Although this is a very conservative criterion, estimation of the position above this error level guarantees the correct positioning of the target. Results of the simulations for noise-free target ($w = 0$) and for $w = 2$ and $w = 5$ are represented in Fig. 2.

We can see in Fig. 2 that for circular targets of diameter larger than 100 px, the localization error is below 0.2 px even for high noise. If one manages to make an adequate image filtering and obtaining a target contour of a 1 px thick line, which is equivalent to a free of noise target, localization can be lower than 0.05 px for diameters larger than 30 px and

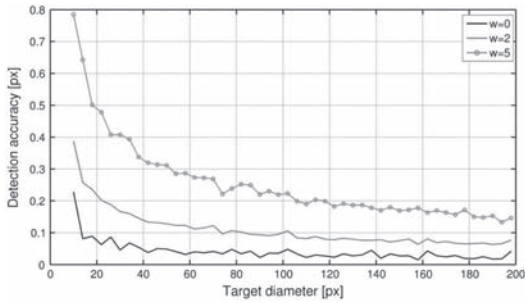


Fig. 2. Accuracy of the sub-pixel method for different dispersion errors. The rough appearance of the graph is due to the discrete nature of the calculations.

below 0.02 px for target diameters larger than 100 px. This means an improvement of 20 to 50 times over the nominal resolution of the camera sensor. Therefore, an adequate pixel to millimeter ratio may provide micrometric accuracy by using simple devices.

4. Validation Results

In order to check the real performance of our proposal, a moving circular target sequence has been captured simultaneously by the Casio camera and a professional camera AOS-XPri. Casio recording mode was set to 420 fps with a spatial resolution of 224×168 px while the AOS camera was set to 250 fps at 800×560 px. This camera used a Navitar Zoom 7000 lens in order to focus the object while the Casio used the built-in objective.

A circular target with 5 cm of diameter was placed at 10 m from both cameras and was manually displaced horizontally with a micro-metric screw. The total displacement was 1 mm left and right. Since the movement is not perfectly controlled, no additional information from the trajectory can be used to diminish the error; therefore, the accuracy estimation is done in the worst possible case. Conversion factor for this distance was 1.25 px/mm for the AOS camera and 0.42 px/mm for the Casio.

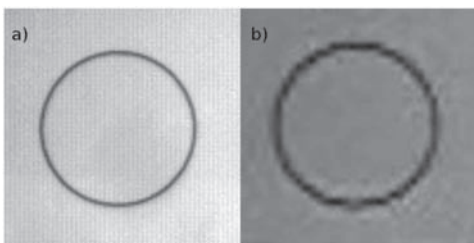


Fig. 3. Video sequence for object tracking. Both sequences have been taken from 10 m distance. Target diameter is 5 cm. (a) Sequence from AOS camera, 250 fps, $100 \text{ px} \times 100 \text{ px}$ and no compression 8 bits AVI format (Media 1). (b) Sequence from CASIO camera, 420 fps, $35 \text{ px} \times 35 \text{ px}$ and AVI-jpeg RGB format (Media 2). This last sequence has been magnified and equalized in order to improve the visualization.

In Fig. 3(a) (Media 1) and 3(b) (Media 2), we represent the captured videos by the AOS and the Casio cameras, respectively. In the first case, the captured sequence is stored without compression; thus, a sequence of 10 s takes around 1 GB. In the second case, the sequence is stored in AVI-JPEG RGB video, so each frame is compressed and, consequently, deteriorated. A 10 s sequence from the pocket camera needs less than 70 MB of storage, so it is faster to manage and process, but at the cost of degrading the image quality. Because the total displacement of the target (1 mm) is at the resolution limit of both cameras, the movement is hard to see in both sequences. In order to allow eye detection of this movement, one must move the video slider by hand causing to jump from the beginning to the middle and to the end of the sequence.

Detection and tracking of the target is done off-line. One point from the center of the target is selected and a convenient threshold for this frame is calculated according to the background level. The binary image is then cleaned through an opening filter and the contour is detected through boundary detection and tracing [20]. The final one-pixel thick contour is then fitted to Eq. (1) and its center is calculated through Eq. (2). The obtained point is used for threshold determination in the next frame.

Although the eye can barely appreciate the target shift, the method is able not only to detect the image displacement, but also the inner structure of the movement. In Fig. 4 we show the horizontal coordinate calculated from the sequence for both cameras. One can see that, despite the differences in the resolution and image quality, both are able to detect the object position. As it is expected, information from the pocket camera is noisier, but the signal is still recognizable. Notice that both cameras detect even the small pauses in the hand-rotated screw. The sub-pixel accuracy of the method can be determined from the last part of the signal, where the target is static. The absolute detection threshold can be estimated by taking three times the standard deviation of the position during the last 1 s interval; thus, obtaining a real resolution of 0.15 mm for the pocket camera and 0.03 mm for the professional one. In both cases, the

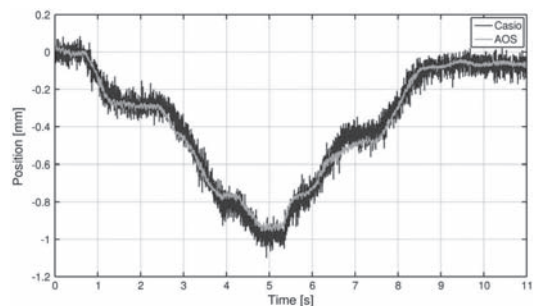


Fig. 4. Target position obtained from sequence in Fig. 2(a) AOS and Fig. 2(b) Casio.

method is able to see variations of around 0.05 px. By considering that our captured targets have diameters of 24 px for the Casio and 63 px for the AOS camera, the accuracy values obtained are congruent with the theoretical values presented in Fig. 2 for noise-free targets.

This experiment clearly shows that the pocket camera is able to measure with great accuracy. We would like to emphasize that the movement was measured from a distance of 10 m and, for this camera, the obtained angular resolution is 2 arc sec or, equivalently, 1 mm at 100 m, making it suitable for use in long distance measurements. Although the AOS camera is almost four times more accurate and 20 times cheaper, thus, being more cost effective for many applications.

5. Vibration Measurement in Real Structures

The sub-pixel method with the pocket camera has also been applied to the measurement of the main vibration parameters of a column in a small structure. We selected a hollow steel column of 2.1 m high composed by two welded beams. As can be seen in Fig. 5(a) the two ends of the column are pinned to the floor and to emergency stairs. A steel ball of 0.44 kg was used as projectile for the impact. The ball was mounted in a pendulum of 1.5 m hanging from the upper part of the column. By releasing the ball from a distance of 90 cm from the column, we achieved an impact at 2.3 m/s [see Fig. 5(b)]. The vibration produced by the impact was registered by the Casio camera focusing on a target attached to the column.

Before starting the experiment, the setup was implemented in a FEM using LS-Dyna code [21]. Both column and ball were modeled with *solid* elements. Steel was modeled as an elastic-plastic material with a Young modulus of 210 Gpa, Poisson modulus 0.3, density 7850 kg/m³, and yield strength 275 Mpa. A similar experiment was done in [8] with other another camera and different detection techniques. Since the mathematical model is the same, details will not be repeated here. In Fig. 5(c), we depict a schematic representation of the model.

We calculated the displacement of the column at the impact height through the numerical analysis. As it is explained in [8], the vibration can be considered monomodal so it can be easily described as an attenuated oscillation

$$y(t) = Ae^{-\mu t} \sin(2\pi ft + \phi), \tag{6}$$

where A is the amplitude of the oscillation, f is the linear frequency, μ is the attenuation constant, and ϕ is a boundary constant. Data from the simulation were fitted to this equation, thus giving the results in Eq. (6) for the different parameters with 95% confidence bounds between brackets and a value for the correlation coefficient of $r^2 = 0.9917$. The subindex s stands for “simulation”.

$$\begin{aligned} A_s &= 0.0933 \text{ mm} && [0.0936 \text{ mm}, 0.0943 \text{ mm}], \\ \mu_s &= 14.61 \text{ s}^{-1} && [14.60 \text{ s}^{-1}, 14.75 \text{ s}^{-1}], \\ f_s &= 66.7 \text{ Hz} && [66.5 \text{ Hz}, 66.8 \text{ Hz}], \\ \phi_s &= -1.572 \text{ rad} && [-1.575 \text{ rad}, -1.568 \text{ rad}]. \end{aligned} \tag{7}$$

The real displacement of the column after an impulsive load was measured with the Casio camera placed at a lateral side of the column. Since the total movement was predicted to be very small, we placed the camera at 15 cm from the target and the macro mode was used [see Fig. 5(b)]. Furthermore, since the expected vibration frequency was not very high the acquisition speed was set to 240 fps at a resolution of 480 x 360 px.

The circular contour of the target that can be seen in Fig. 5(b) can be extracted by hard-clipping and boundary tracing. Fitting this contour to the ellipse in Eq. (1), we obtain the centre coordinates, which are depicted in Fig. 6. Movement of the column occurs in transversal direction and the impact can be clearly seen in the movement of the x_c coordinate. One can also appreciate that the target slightly moves in the vertical direction with a delay of 0.04 s with respect to the beginning of the horizontal vibration. This residual movement comes from transmitted vibration from the floor to the camera.

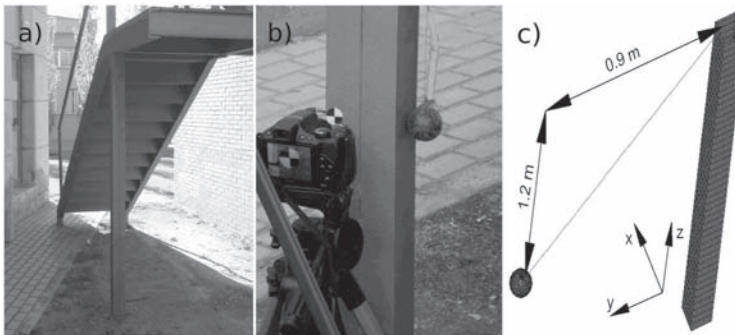


Fig. 5. (a) Measured structure. (b) Position of the camera and pendulum. (c) Scheme of the experiment and model use for the Finite Element simulation.

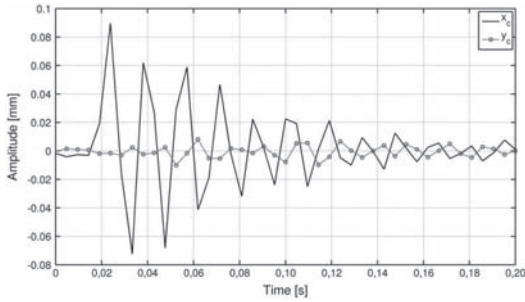


Fig. 6. Coordinates of the tracked center of the target.

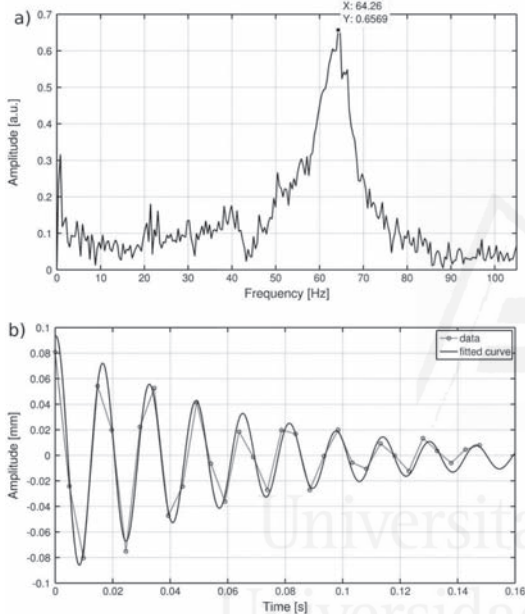


Fig. 7. (a) Fourier transform of the vibration of the column obtained from the horizontal position of the target (see Fig. 5). (b) Data fitting to Eq. (5).

Undoubtedly, this effect will add some noise to the signal, but will not interfere with the registered target movement.

As it was done in the previous section, the accuracy of the method was checked by analyzing a sequence of the static target. Both x and y coordinates oscillate around a fixed position about 0.07 px ($3 \times \text{STD}$). By

considering that the whole target has a size of 2 cm , the obtained resolution is 17 px/mm ; hence, giving a spatial resolution of around $4 \text{ }\mu\text{m}$.

Results obtained from the coordinate x_c were fitted to the Eq. (5). Fourier transform of the obtained signal is shown in Fig. 7(a). As it happened with the simulation, the movement can also be considered monomodal. In Fig. 7(b), we depict an example of the obtained data together with the fitting graph (a monomodal attenuated oscillation). In Table 1, we show the values obtained for three different trials together with the 95% confidence bounds. The value for the constant ϕ has been omitted from the analysis since it is different for each case and it does not add any relevant physical information.

By comparing these results with those from the simulation one can see that there is a good coincidence between the model and the experiment. Only a displacement in the frequency is observed but this can be explained since the model does not take into account all boundary conditions of the real structure (damping of the soil, real structure, material, welding properties, etc).

We would like to underline that, with a pocket camera, one can measure vibrations with an accuracy of few micrometers, which is much higher than other more expensive devices. Although distance from the camera to the element is really short, this can be improved by adapting a telescopic system to the camera and placing it further from the experimental setup.

6. Conclusions

In this paper, we have presented a simple and very efficient method for microvibrations measurements that improves others from the references. We have demonstrated the possibility of using a pocket camera for high speed object tracking. On the one hand, the application of contour-based methods reduces the influence of noise and irregular illumination on the target. On the other hand, the use of targets of known geometrical shapes allows obtaining sub-pixel accuracy through least square fitting of the object contour. To the best of our knowledge, this is the first method that is able to measure micrometric vibrations in a wide frequency range. Additionally, the proposal is very cost-effective since it can be implemented on a pocket camera and with no specific software.

Two experiments prove the usability of these cameras for target tracking. In one experiment, we used a high frame-rate with low spatial accuracy. The object was situated relatively far from the cameras and

Table 1. Results from F = the Target Position to an Attenuated Movement

	$A(\text{mm})$	$\mu(\text{s}^{-1})$	$f(\text{Hz})$	r^2
Test 1	0.103 [0.089, 0.117]	15.6 [12.5, 18.7]	61.0 [60.5, 61.5]	0.9548
Test 2	0.096 [0.087, 0.105]	15.5 [12.5, 18.1]	61.6 [61.1, 62.5]	0.9675
Test 3	0.103 [0.093, 0.114]	15.8 [13.2, 18.3]	61.3 [60.9, 61.6]	0.9693
Mean \pm std	0.101 ± 0.004	15.6 ± 0.4	61.3 ± 0.3	

it was moved without a predefined trajectory. The pocket camera showed to have a very good performance even in situation where a naked eye cannot appreciate any movement. We achieved an accuracy improvement of more than one order of magnitude, being able to record variations of 2 arc sec in long distances or few micrometers in short distances. In the second experiment, the target was attached to a real structure. The vibration of a steel column after an impulsive load was measured and their main parameters determined with high accuracy.

We would like to underline that these methods can be also used in high-end cameras, where spatial resolution and image quality is higher, therefore, higher gain is expected. Nevertheless, high-end cameras are more expensive and their use is not advisable due to the environment (dust, impact danger, exposition to climatology). Additionally, these cameras usually require of a complementary computer to download the sequences and external power suppliers. On the contrary, pocket cameras are cheaper and smaller. They use batteries and small memory cards that can be easily replaced. Thus, many preliminary trials can be done with these cameras and preserve the high end camera for final experiments.

The authors would like to acknowledge the financial support of the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación through the project FIS2009-05639-ET and BIA2011-22704, the Generalitat Valenciana through the project PROMETEO/2011/021 and the University of Alicante through the project GRE10-09. A. B. Roig thanks the support of Cajamurcia. The authors have not any commercial interest in Casio, AOS or other camera manufacturer.

References

1. C. Gentile and A. Saisi, "Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment," *Constr. Build. Mater.* **21**, 1311–1321 (2007).
2. A. K. Chopra, "Equations of Motion, Problem Statement and Solution Methods," eds., B. Stenquist and K. Scherwatzky, in *Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd Ed. (Prentice-Hall, 2001), pp. 23–25.
3. S. C. Stiros, "Errors in velocities and displacements deduced from accelerographs: An approach based on the theory of error propagation," *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **28**, 415–420 (2008).
4. A. Cunha, E. Caetano, and R. Delgado, "Dynamic tests on a large cable-stayed bridge," *J. Bridge Eng. ASCE* **6**, 54–62 (2001).
5. H. N. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," *NDT & E Int.* **38**, 213–228 (2005).
6. M. Pieraccini, M. Fratini, F. Parrini, C. Atzeni, and G. Bartoli, "Interferometric radar vs. accelerometer for dynamic monitoring of large structures: An experimental comparison," *NDT & E Int.* **41**, 258–264 (2008).
7. C. Gentile and G. Bernardini, "Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements," *Nondestruct. Test. Eval.* **41**, 544–553 (2008).
8. J. J. Lee and M. Shinozuka, "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement," *NDT & E International* **39**, 425–431 (2006).
9. B. Ferrer, J. Espinosa, J. Perez, S. Iborra, and D. Mas, "Optical scanning for structural vibration measurement," *Res. Nondestruct. Eval.* **22**, 61–75 (2011).
10. Edmund Optics Catalog, <http://www.edmundoptics.com>.
11. M. R. Shortis, T. A. Clarke, and T. Short, "Comparison of some techniques for the sub-pixel location of discrete target image," *Proc. SPIE* **2350**, 239–250 (1994).
12. M. R. Shortis, T. A. Clarke, and S. Robson, "Practical testing of the precision and accuracy of target image centring algorithms," *Proc. SPIE* **2598**, 65–76 (1995).
13. A. M. Bruckstein and A. O'Gorman, "Design of shapes for precise Image registration," *IEEE Trans. Inf. Theory* **44**, 3156–3162 (1998).
14. J. C. Trinder, J. Jansa, and Y. Huang, "An assessment of the precision and accuracy of methods of digital target localization," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **50**, 12–20 (1995).
15. I. Maalen-Johansen, "On the precision of sub-pixel measurements in videometry," *Proc. SPIE* **2252**, 169–178 (1993).
16. J. C. Crocker and D. G. Grier, "Methods of digital video microscopy for colloidal studies," *J. Colloid Interface Sci.* **179**, 298–310 (1996).
17. R. Kurita and E. R. Weeks, "Experimental study of random close-packed colloidal particles," *Phys. Rev. E* **82**, 011403 (2010).
18. W. Tong, "Sub-pixel image registration with reduced bias," *Opt. Lett.* **36**, 763–765 (2011).
19. O. Gal, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fitellipse>.
20. Mathworks Inc, <http://www.mathworks.es/help/toolbox/images/>.
21. LS-DYNA Keyword Manual (v.970), Livermore Software Technology Corporation, April 2003.

Publicación 3

Open-access operating algorithms for commercial videokeratographer and improvement of corneal sampling

Appl. Optics, **52** (24-29), 2013.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Open-access operating algorithms for commercial videokeratographer and improvement of corneal sampling

Julián Espinosa,^{1,2,*} David Mas,^{1,2} Jorge Pérez,^{1,2} and Ana Belén Roig²

¹Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías (IUFACyT), Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, San Vicente del Raspeig, Alicante 03690, Spain

²Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, San Vicente del Raspeig, Alicante 03690, Spain

*Corresponding author: julian.espinosa@ua.es

Received 25 September 2012; revised 19 November 2012; accepted 10 December 2012; posted 11 December 2012 (Doc. ID 176838); published 21 January 2013

We present an algorithm to process images of reflected Placido rings captured by a commercial videokeratoscope. Raw data are obtained with no Cartesian-to-polar-coordinate conversion, thus avoiding interpolation and associated numerical artifacts. The method provides a characteristic equation for the device and is able to process around 6 times more corneal data than the commercial software. Our proposal allows complete control over the whole process from the capture of corneal images until the computation of curvature radii. © 2013 Optical Society of America

OCIS codes: 330.7327, 100.2000.

Universitat d'Alacant

1. Introduction

Commercial videokeratometers provide useful information about corneal topography and the tear film quality. Some of them are capable of continuous recording of the eye, a fact that allows the analysis of dynamic changes in the corneal surface [1,2]. However, none of available devices allows full control of the camera and processing algorithms. In all the cases, the information in obtaining a corneal topography is hidden, in spite of being of interest for researchers. Additionally, data maps are usually sparse, providing low data density, typically below 100 samples/mm², and the surface map is often completed through numerical interpolation.

Among commercial Placido-based videokeratoscopes, the Medmont E300 (Medmont Pty., Ltd., Victoria, Australia) has shown to have a high degree of accuracy and precision for measuring spherical

and aspherical test surfaces [3] and high repeatability of measurements of *in vivo* corneas [4]. The device automatically captures four corneal topography images once the projection head, which includes the camera, is properly situated [5]. As a result, the system offers a clear image of the reflected Placido rings. Through the software package, it is possible to obtain the curvature maps and export the data to an ASCII file that can be later processed.

Even though main data can be exported, they have already been processed, and algorithms and system specifications are not available due to proprietary reasons. Therefore, results are not always reproducible by the user. Some works in the literature [6–8] try to improve videokeratography algorithms avoiding proprietary limitations. In [6], the authors detail the algorithms and procedures to recalibrate a topographer and obtain the raw data of corneal curvature. Briefly, the key point to the calculation of the curvature radius at a point consists of a correct detection and labeling (ordering) of the projected rings. The system is previously calibrated using a

1559-128X/13/070C24-06\$15.00/0
© 2013 Optical Society of America

set of spheres of known curvature radii. Then, the curvature radius data are obtained through linear interpolation.

An important drawback of these customized methods comes from the Cartesian-to-polar-coordinate conversion of the image, which is usually performed under the assumption of facilitating the image processing due to advantages from the symmetry of the rings. A correct conversion needs a precise knowledge of the center position. Since the cornea is not a symmetric spherical surface, contrary to what is assumed in the Cartesian-to-polar conversion, projected rings are neither completely circular nor concentric. This lack of circular symmetry of the rings leads to a loss and distortion of acquired information, while the fact that any ring has different center position may introduce prismatic effects and high-order aberrations that do not correspond to reality.

In order to overcome these problems, we present an algorithm to process captured images of reflected Placido rings. It avoids Cartesian-to-polar-coordinate conversion of corneal data and the subsequent interpolation. The proposal consists of building an interpolation surface with the help of calibration spheres of known radius. Placido rings reflected in the curved surface are segmented and classified through an elliptical scanning algorithm. Then, data are fitted to a unique calibration equation that characterizes the topographer. This equation and the scanning algorithm are finally used to process captured images of human corneas and get curvature radii.

The manuscript is structured as follows: the method is presented in Section 2. In Section 3, we check the reliability of the algorithm by measuring the set of steel spheres. The method is also applied to a human cornea, and the result is compared with data provided by a Medmont topographer. Finally, the main outcomes of the proposal are underlined in the Conclusions Section.

2. Method

The experimental setup was adapted from the one described in [6]. Polished metal spheres of known radius were measured with a Medmont E-300 corneal topographer. At this point, the use of one or another

device is irrelevant. The main advantages of the E-300 are the possibility of removing the color map and accessing to the original image of the reflected rings. The device is manually focused, so skilled operators are recommended to take measurements. The captured images were then processed with MATLAB following procedures designed by the authors. As we stated in Section 1, the main new features of the method are related to the software, which has been redesigned to overcome the previously exposed drawbacks.

A. Ring Extraction: Frame Binarization

The camera of the topographer provides a gray-scale image of the reflected rings [Fig. 1(a)]. First, we need to identify and isolate each ring. Unfortunately, gray level varies much across the image, so the image contrast needs to be optimized prior to further manipulation. In order to enhance the contrast, we use the morphological operators opening and closing top-hat filters.

Gray-scale morphology is a powerful tool to analyze and process geometrical structures inside images. The most basic operations of gray-scale morphology are erosion \ominus and dilation \oplus , whose definitions can be found elsewhere [7]. The opening and closing operation of an input image F by a structuring element B are defined by

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B, \quad (1a)$$

$$F \cdot B = (F \oplus B) \ominus B, \quad (1b)$$

respectively. The opening and closing top-hat operations are defined from them as

$$\text{OTH}_{FB} = (F - F \circ B), \quad (2a)$$

$$\text{CTH}_{FB} = (F \cdot B - F). \quad (2b)$$

Top-hat operation has some characteristics of high-pass filtering. The opening and closing top-hat operations can detect wave crests or hollows in an image, respectively. Therefore, from the initial image [Fig. 1(a)], we perform, on the one hand, an opening top-hat operation with a disk-shaped flat

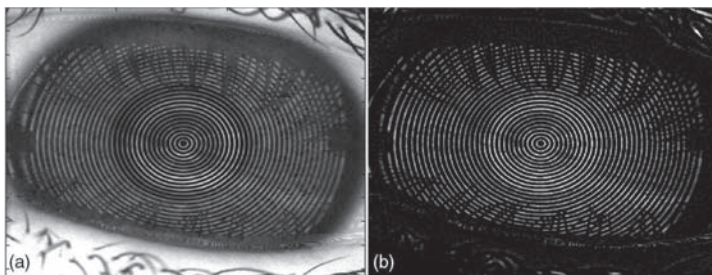


Fig. 1. (a) Initial frame. (b) Open minus close top-hat filtered frame.

structuring element of radius 5 pixels. On the other hand, using the same structuring element, we operate a closing top-hat operation also over the initial frame. Then contrast is improved by subtracting the closed top-hat from the open top-hat filtered images, as can be seen in Fig. 1(b).

The filtered frame is then binarized, recentered, and cropped or zero padded to a square matrix [Fig. 2(a)]. The next task consists of identification and correct classification of Placido rings.

B. Ring Labeling: Elliptical Scanning Algorithm

The elliptical scanning algorithm is an effective method to individually detect and label the projected rings. It defines an elliptical annulus one pixel wide, which grows pixel per pixel and scans the image from center to periphery. The scanning is used to detect and label each ring.

First, the center of the topography is estimated by calculating the centroid in the clean image. Then the amount and radii of the rings is estimated just by counting the lines through the longest meridian. Usually, it is from the center to nose, mainly because the shadows of the eyelashes block other directions.

From the center of the figure, the scanning starts with an annulus of radius one, or at least lower than the location assigned to first ring in the meridian. The annulus grows pixel by pixel until a pixel different to zero is detected. The detected ring is labeled according to its ordered position from the center. The annulus continues growing and adding pixels to this ring until it again detects all pixels equal to zero, i.e., when the scanning annulus reaches the gap between two consecutive rings.

Pixels that form a ring are fitted to an ellipse, thus obtaining its geometrical parameters (center coordinates, size of the axes, and tilt). These parameters are used to implement the elliptical annulus that will continue the scan. The process is repeated until the algorithm is unable to discern a unique ring. In Fig. 2(b), we present a frame of the elliptical scanning (Media 1). It correctly detects up to 29 rings that correspond approximately to the whole iris.

The typical approach establishes that, from each classified ring, one can obtain two edges just by isolating the inner and outer perimeter pixels. This way, the density of the radial sampling is increased. Nevertheless, in real eyes, eyelashes and other reflections cause broken rings that difficult a direct ring-to-edge conversion. In order to avoid errors, the double-edge extraction is only done when possible, i.e., when the ring is not broken (Fig. 3). This usually happens in the pupil area, which is the most important to determine the image quality. In the shown case, we go from 29 labeled rings [Fig. 2(b)] to 39 different radial distances.

C. Image Calibration

In order to have a full control over the calculation of the corneal maps, we propose our own calibration algorithm. Thus, from the labeled rings, a point-to-point curvature map of the cornea will be calculated. Some authors describe this method as the look-up table or calibrated-spheres algorithm [8–10]. In [6], the authors used 18 steel spheres of known curvature radius with an accuracy of 10 μm to obtain a set of calibration curves that describe each of the reflected rings. The curvature radius of the calibration surface ρ for each labeled ring l was related to the mean radial distance R , i.e., the ring radius, through

$$R = m_l \rho + n_l, \quad (3)$$

where $l = 1, \dots, L$ represents the ring labels, and L is the maximum number of detected rings. Mean radial distance was computed as the average of the distances obtained after transforming the image from Cartesian to polar coordinates. Unfortunately, as we pointed above, this approach may introduce important calibration errors.

In this work, we used 12 spheres of curvature radii ranging from 7 to 10 mm, and we apply the elliptical scanning ring algorithm in order to detect, join, and label the pixels belonging to each ring. We propose obtaining a calibration surface, i.e., a unique calibration equation that depends on ρ and l alternatively to the set of calibration curves in Eq. (3).

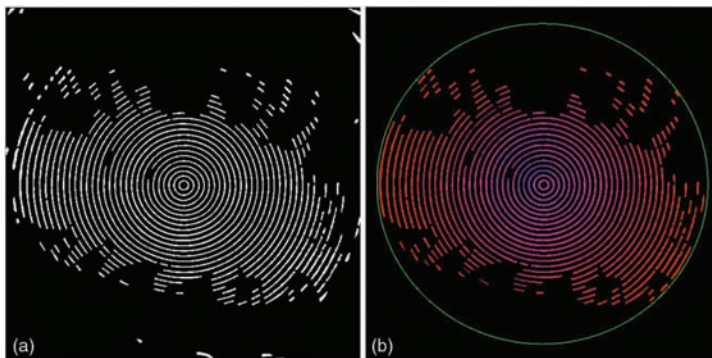


Fig. 2. (Color online) (a) Initial binarized frame. (b) Final-frame excerpts from video of the labeling of projected rings through the scanning annulus (Media 1).



Fig. 3. Detected rings and edges obtained from the inner and outer perimeters of those which are not broken.

3. Results

Following the above-described algorithms from the known curvature radii and by classifying reflected rings, we just need to estimate the mean radial distance. Now, R is set as the radius obtained from fitting a circumference to each ring. We have fitted data from calibration spheres to Eq. (3) and represented both m_l and n_l as a function of l in Fig. 4. Both parameters show a linear dependence on the label, which can be expressed as $m_l = pl$ and $n_l = ql$. Hence, if we come back to Eq. (3) and introduce a linear dependence on l , we get the calibration formula

$$R = pl\rho + ql \rightarrow R = pl\left(\rho + \frac{q}{p}\right) \rightarrow R = pl(\rho + s), \quad (4)$$

which only stands for the curvature operation range of the topographer. Now, coefficients p and s are obtained through least-squares fitting the calibration

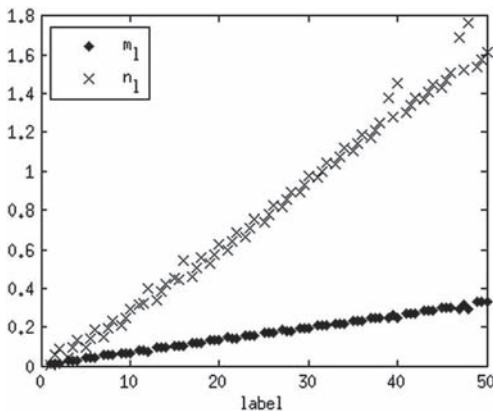


Fig. 4. Slopes and ordinates at origin as a function of the labels.

parameters to Eq. (4), i.e., the sphere curvature radii and radial distances of reflected rings. Following Eq. (5), we can obtain the curvature radius $\rho(x, y)$ at any point (x, y) of a ring reflected on an unknown curved surface. We just have to determine the label $l_{(x,y)}$ and the distance $R(x, y)$ from this point to the center of the frame:

$$\rho(x, y) = \frac{R(x, y)}{pl_{(x,y)}} - s, \quad (5a)$$

$$\Delta\rho(x, y) = \frac{R(x, y)}{p^2l_{(x,y)}} \Delta p + \Delta s. \quad (5b)$$

$\Delta\rho(x, y)$ is the absolute error in the radius determination. Notice that we provide a unique calibration equation, alternatively to the set of curves in [6].

Furthermore, the consideration of both rings and edges increases the accuracy in the measurement of the surface since it results in a denser sampling. However, it also implies obtaining two different calibration surfaces. It depends on whether we consider the rings or the edges. In order to avoid this, both edges and rings can be consecutively labeled from center to periphery. Edges are classified with integer numbers, whereas for rings, we take into account that they match the gap between two consecutive edges, so they are labeled with the corresponding integer and a half.

Hence, we have processed images from the calibration spheres and least-squares fitted to Eq. (4) the data for edges, rings, and both them (596, 346, and 942 points, respectively). Obtained parameters are shown in Table 1.

All the fittings provide similar parameters, low root-mean-square errors (RMSEs), and a high correlation between variables. In Fig. 5, we present the calibration surface obtained if we only consider the rings.

We have checked the consistency of the method just by applying the algorithm to measure the curvature radius of each sphere used in the calibration process. Our algorithm provides between 45,000 and 59,000 raw curvature points (it depends on the sphere) sampled in a 580×580 matrix. It implies a sampling average of 420 mm^{-2} , which is 4 times better than resolutions obtained in typical commercial devices.

We have averaged out the obtained curvature radii and have compared them with the real ones (Fig. 6). The errors in the mean curvature radii are around 0.07 mm. If we suppose a spherical cornea of radii 8 mm, that mean error implies a 0.25 diopter indetermination in the corneal power, which is in the limit of clinically detectable error. In Fig. 6, we also compare the averages of data provided by Medmont and the real ones. Both serial data have been fitted to the equation $C_{\text{mean}} = aC_{\text{real}}$ showing a good agreement, as one can see in Table 2.

Table 1. Parameters of the Calibration Surface Obtained from the Fitting to Eq. (4)

	$p(\times 10^{-3})$	$\Delta p(\times 10^{-3})$	s (mm)	Δs (mm)	RMSE (mm)	R^2
Edges	9.27	0.03	2.34	0.03	0.02	0.999
Rings	9.31	0.03	2.30	0.04	0.02	0.999
Edges and rings	9.28	0.02	2.32	0.03	0.02	0.999

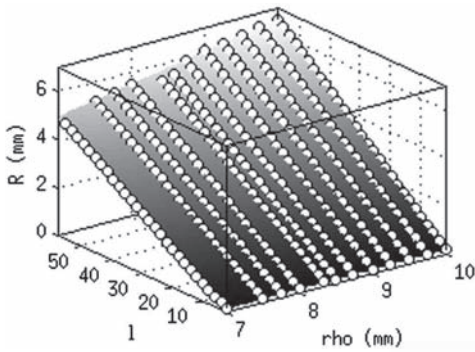


Fig. 5. Calibration surface obtained just taking into account the rings.

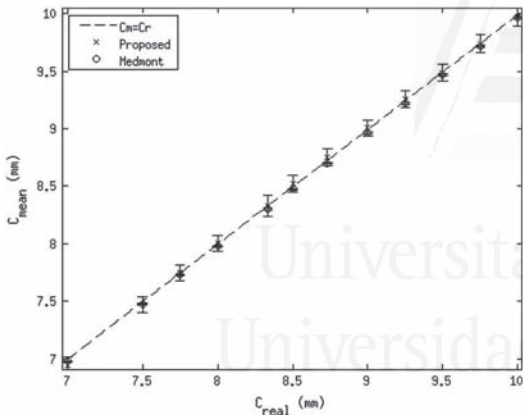


Fig. 6. Mean curvature radii of the calibration spheres obtained both by our algorithm and Medmont.

In order to clarify the differences between both approaches, in Fig. 7 we show the sampling distribution obtained following the different methods discussed here. We represent our obtained samples (raw data) versus radial distance, compared with a standard

Table 2. Parameter Coefficients for the Fitting Used to Check the Consistency of the Method

	$\alpha(\text{mm}^{-1})$	$\Delta\alpha(\text{mm}^{-1})$	RMSE (mm)	R^2
Proposal	0.9990	$8e-4$	$6e-3$	0.999
Medmont	0.99660	$1e-5$	$1e-4$	1

Cartesian sampling of 100 mm^{-2} and with constant radial sampling density provided by Medmont, in a Cartesian quadrant for a real eye. Note that samples in the standard case fall at high radial distance due to the lack of data (eyelash shadows). At this point, we would like to underline that the E300 software provides the facility to export topographic data for the selected exam to a set of text files. Those data are axial and tangential curvatures, surface height, radial distance, and surface slope data. Each line of the files contains the data of a single meridian (centered at the keratometric axes) with data points for each ring. There are 300 meridians each with 32 samples, i.e., the number of rings. However, this uniform radial sampling does not match the data captured with a CCD, so we guess that these are processed data. Contrary to our case, data provided are not raw data but computed through proprietary algorithms.

In order to make clear the differences between both approaches, we have compared results of a real corneal measurement. Curvature data usually provided by Medmont are shown in Fig. 8(a). There are around 5000 sampled points with a spatial frequency of 64 mm^{-2} . In Fig. 8(b), we represent data obtained through our method. There are 30,113 sampled points with a spatial frequency of 360 mm^{-2} . Therefore, in this case, our method allows us to analyze around 6 times more data than those provided by Medmont.

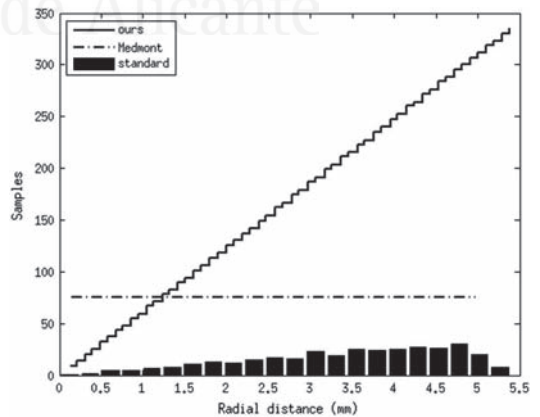


Fig. 7. Real samples using the posed method versus radial distance compared with those for a standard Cartesian sampling of 100 mm^{-2} and with constant radial sampling density provided by Medmont, in a Cartesian quadrant obtained for a real eye.

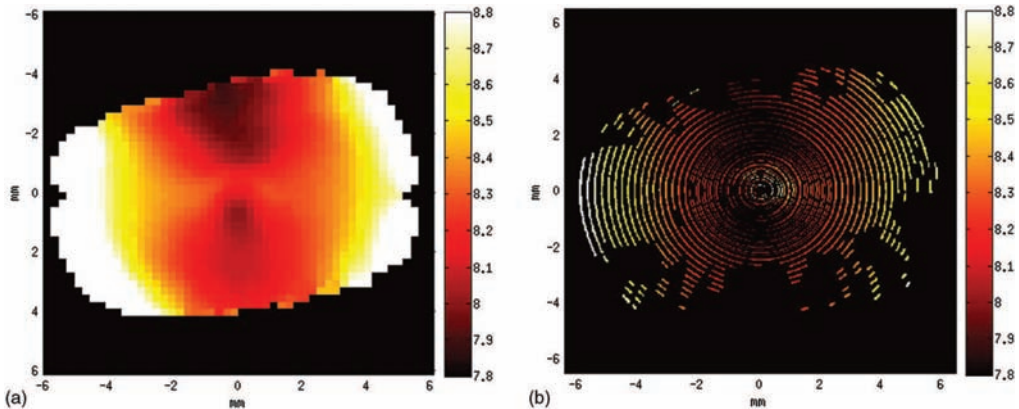


Fig. 8. (Color online) (a) Curvature radii from Medmont. (b) Obtained curvature radii.

4. Conclusion

Open access to the software and to the parameters of the video camera permits more complex experiments than those that can be done with a commercial device. Thus, with the help of the E300 videokeratograph platform, we have built an equation to characterize the curvature radius computation. The method can be easily adapted to work on any topographer so that it can provide additional information about the cornea at no additional cost.

In [11], the authors propose applying weighted least-squares regression that compensates the unequal influence of sectors due to the sampling distribution. They argue that traditional least-squares fitting on an optical surface does not pay attention to the particular sampling distribution of the analyzed surfaces. The adequate distribution of the samples depends both upon the geometry of the domain and the properties of the approximating functions. The uniform (x, y) grid is better suited for translational-invariant domains and functions and not for rotationally symmetric polynomials on a disk. However, the conversion from a uniform Cartesian grid to a polar one provides both radial and angular sampling not uniformly spaced.

The elliptical scanning algorithm allows an analysis of annular regions of the surface. This fact reduces the unequal density of samples in different sectors of the sampled surface and allows the improvement of optical surfaces fitting. Therefore, despite the method not completely overcoming the above exposed sampling inconvenience, it avoids the angular sampling interpolation.

From the algorithms here presented, it is possible to introduce convenient modification in the calibration process and temporal and spatial resolution of the camera and the numerical algorithms to obtain new information about dynamic processes in the cornea and the tear film. The method provides a higher density of corneal curvature data, which makes possible the analysis of small corneal defects, evolution of scars, ulcers, etc. Additionally, it avoids

proprietary rights and patents, so all the measuring process is controlled.

The authors provide the computation algorithms upon request. The authors would like to acknowledge the financial support of the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación through the project BIA2011-22704, the Generalitat Valenciana through the project PROMETEO/2011/021, and the University of Alicante through the project GRE10-09. A. B. Roig thanks Fundación Cajamurcia for the grant “Beca de investigación Cajamurcia 2010.”

References

1. T. Goto, X. Zheng, S. D. Klyce, H. Kataoka, T. Uno, M. Karon, Y. Tatematsu, T. Bessyo, K. Tsubota, and Y. Ohashi, “A new method for tear film stability analysis using videokeratography,” *Am. J. Ophthalmol.* **135**, 607–612 (2003).
2. D. R. Iskander and M. J. Collins, “Applications of high-speed videokeratography,” *Clin. Exp. Optom.* **88**, 399–407 (2004).
3. W. Tang, M. J. Collins, L. Carney, and B. Davis, “The accuracy and precision performance of four videokeratographs in measuring test surfaces,” *Optom. Vis. Sci.* **77**, 483–491 (2000).
4. P. Cho, A. K. C. Lam, J. Mountford, and L. Ng, “The performance of four different corneal topographers on normal human corneas and its impact on orthokeratology lens fitting,” *Optom. Vis. Sci.* **79**, 175–183 (2002).
5. S. A. Read, M. J. Collins, L. G. Carney, and R. J. Franklin, “The topography of the central and peripheral cornea,” *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.* **47**, 1404–1415 (2006).
6. D. Mas, M. A. Kowalska, J. Espinosa, and H. Kasprzak, “Custom design dynamic videokeratometer,” *J. Mod. Opt.* **57**, 94–102 (2010).
7. J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology* (Academic, 1983).
8. L. A. V. De Carvalho, A. C. Romao, S. Tonissi, F. Yasuoka, J. C. Castro, P. Schor, and W. Chamon, “Videokeratograph (VKS) for monitoring corneal curvature during surgery,” *Arq. Bras. Oftalmol.* **65**, 37–41 (2002).
9. C. Roberts, “Characterization of the inherent error in a spherically-biased corneal topography system in mapping a radially aspheric surface,” *J. Refract. Corneal Surg.* **10**, 103–111 (1994).
10. S. A. Klein, “Corneal topography: a review, new ANSI standards and problems to solve,” in *Vision Science and its Applications*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2000), paper NW8.
11. J. Espinosa, J. Pérez, D. Mas, and C. Illueca, “Weighted Zernike polynomial fitting in steep corneas sampled in Cartesian grid,” *J. Mod. Opt.* **58**, 1710–1715 (2011).

Publicación 4

Vibration frequency measurement using a local multithreshold technique

Opt. Express, **21** (26198-26208), 2013.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Vibration frequency measurement using a local multithreshold technique

Belen Ferrer,¹ Julian Espinosa,² Ana B. Roig,³ J. Perez,² and D. Mas^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Univ. Alicante P.O. Box, 99, 03080 Alicante Spain

²Inst. of Physics Applied to the Sciences and Technologies, Univ. Alicante P.O. Box, 99, 03080 Alicante Spain

³Department of Optics, Univ. Alicante P.O. Box, 99, 03080 Alicante Spain

*david.mas@ua.es

Abstract: In this paper, we demonstrate the use of a video camera for measuring the frequency of small-amplitude vibration movements. The method is based on image acquisition and multilevel thresholding and it only requires a video camera with high enough acquisition rate, not being necessary the use of targets or auxiliary laser beams. Our proposal is accurate and robust. We demonstrate the technique with a pocket camera recording low-resolution videos with AVI-JPEG compression and measuring different objects that vibrate in parallel or perpendicular direction to the optical sensor. Despite the low resolution and the noise, we are able to measure the main vibration modes of a tuning fork, a loudspeaker and a bridge. Results are successfully compared with design parameters and measurements with alternative devices.

©2013 Optical Society of America

OCIS codes: (100.2000) Digital image processing; (120.7280) Vibration analysis; (040.7290) Video.

References and links

1. J. J. Lee, Y. Fukuda, M. Shinozuka, S. Cho, and C. Yun, "Development and application of a vision-based displacement measurement system for structural health monitoring of civil structures," *Smart Struct. Syst.* **3**(3), 373–384 (2007).
 2. H. N. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," *NDT Int.* **38**(3), 213–218 (2005).
 3. E. Valero, V. Micó, Z. Zalevsky, and J. Garcia, "Depth sensing using coherence mapping," *Opt. Commun.* **283**(16), 3122–3128 (2010).
 4. F. Hild and S. Roux, "Digital Image Correlation: from displacement Measurement to identification of elastic properties – a review," *Strain* **42**(2), 69–80 (2006).
 5. J. C. Trinder, J. Jansa, and Y. Huang, "An assessment of the precision and accuracy of methods of digital target localization," *ISPRS J. Photogramm.* **50**(2), 12–20 (1995).
 6. D. Mas, J. Espinosa, A. B. Roig, B. Ferrer, J. Perez, and C. Illueca, "Measurement of wide frequency range structural microvibrations with a pocket digital camera and sub-pixel techniques," *Appl. Opt.* **51**(14), 2664–2671 (2012).
 7. D. Teyssieux, S. Euphrasie, and B. Cretin, "MEMS in-plane motion/vibration measurement system based CCD camera," *Measurement* **44**(10), 2205–2216 (2011).
 8. D. Mas, B. Ferrer, J. T. Sheridan, and J. Espinosa, "Resolution limits to object tracking with subpixel accuracy," *Opt. Lett.* **37**(23), 4877–4879 (2012).
 9. J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques," *Int. J. Comput. Vis.* **12**(1), 43–77 (1994).
 10. D. Mas, B. Domenech, J. Espinosa, J. Pérez, C. Hernández, and C. Illueca, "Noninvasive measurement of eye retraction during blinking," *Opt. Lett.* **35**(11), 1884–1886 (2010).
 11. B. Ferrer, J. Espinosa, J. Perez, S. Ivorra, and D. Mas, "Optical scanning for structural vibration measurement," *Res. Nondestruct. Eval.* **22**(2), 61–75 (2011).
 12. J. Espinosa, B. Ferrer, D. Mas, J. Perez and A. B. Roig, "Método y sistema para medir vibraciones," Patent pending n° P201300498 (05–23–2013).
 13. Casio Europe at <http://www.casio-europe.com/euro/exilim/exilimzrserie/exzr1000/> (visited on 09/03/2013).
 14. AOS Technologies at <http://www.aostechnologies.com/high-speed-imaging/products-high-speed/> (visited on 10/09/2013).
-

1. Introduction

Vibration measurement and analysis is an important topic in many scientific fields, like structural engineering, acoustics, biotechnology, entertainment devices, security and surveillance. Although there exist different methods for measuring vibrations, accelerometers are usually preferred. These devices register the local acceleration of the specific point of the specimen where they are attached. Since they are contact devices, they are difficult to use when the specimen is not accessible due to the object itself or the surrounding conditions (inaccessibility, damage risk, etc.) [1].

Alternatively to the accelerometers Doppler, vibrometers are used as non-contact devices. A test laser beam is sent against a moving surface. The device collects the light scattered from it and, then, it is interfered with a reference beam. Although they provide very accurate result, their measuring distance may remain short due to attenuation. Additionally, they result really expensive and no-cost effective for many applications [2].

Recently, Valero et al. presented a method for motion detection with special application in sound registration [3]. The method is based on the detection and processing of a defocused coherent speckle pattern. Results are accurate but, under our point of view and despite the usefulness and applicability of the method, it presents several drawbacks: reflectivity of the scattering surface has to fulfill some requirements of roughness and there is a need of a laser probe that will attenuate its intensity with the distance.

In the last years, image based methods are becoming a reliable alternative to non-contact measurement of movement and vibrations. Most common methods are based in object recognition and tracking through digital image correlation [4]. Although they are easy to implement, they require of high-resolution cameras, which may not be always available. Other methods allow measurements with an improvement of the physical resolution of the acquiring device and are known as sub-pixel method [5]. Sub-pixel techniques have been shown to produce accurate results even with low cost devices, being a real alternative to traditional methods, since they may increase the theoretical resolution in more than 50 times [6].

One of the simplest approaches to the sub-pixel techniques consists of analyzing the response of a single detector (pixel) when detecting an edge. Light diffused by an object surface usually presents smooth transitions, but proper illumination conditions can induce abrupt brightness changes between different areas defined by a different slope, texture, color, height or any other property. Discrete size of the sensors in the CCD or CMOS arrays makes that, eventually, light coming from both parts of an object border (in and out) falls onto the same sensor thus giving a response that depends on the value of each region and the area covered by them. As we will show below, these pixels are very sensitive to changes in the scene and proper analysis of this "border region" may provide useful information about object movements. Based on this principle, the authors in [7] propose to use the energy gradient produced by optical diffraction in external border regions to accurately measure the in-plane vibrations of micro devices. Achieved resolutions are of the order of 0.001 px, although the method seems to be limited to micro-objects.

In [8], the authors present a simple that only considers binary levels and counting dots. Their method was based on the probability of detecting a single pixel change in the whole scene and show that the motion detection accuracy could be increased in several orders of magnitude, up to 10^{-6} px. The proposal is proven through a theoretical experiment by using an object consisting on a sparse random cloud of dots. The problem is that those analyzed objects are difficult to implement, so optimum resolutions are hard to achieve in practical applications. Despite this improvement, this method still needs a target to be attached to the specimen under analysis, so it is not a general valid solution for inaccessible objects.

In this paper, we propose a sub-pixel technique for measuring frequency vibrations of standard objects without using external elements like targets, physical probes or optical beams. The method is based on searching differences between successive frames and quantifying them. Although the philosophy is well known, convenient arrangement of the

information provides an efficient solution for frequency measurement. Moreover, it is implemented with a simple setup composed by a pocket camera, a tripod and a standard computer running with Matlab.

From a captured frame, our method consists of taking a small region of interest where light intensity variation due to object vibration is expected to happen. Instead of considering small variations of intensity, the analysis is done at different thresholded levels so only binary information is considered. Variation in the number of white pixels inside the region is tracked in order to obtain the frequency of the vibration movement.

In some sense, the method is related to determination of optical flow like in [9], where the time-evolution of the pixels in a video sequence is analyzed. Nevertheless, our approach is simpler and does not consider voxels but image blocks. Additionally, no estimation of velocity or movement direction is done thus resulting in a faster and more efficient algorithm. Although this may seem a small advantage, the reader should notice that high-speed sequences of relatively long processes (several seconds) produce a huge amount of images that have to be stored and analyzed. With our proposal, analysis of here presented sequences (~1000 frames) is done in less than one minute, which is very convenient for many applications.

The manuscript is developed as follows: in the next section, we describe the main methods, materials and experiments that have been used. In Section 3, we present the results of our experiments and compare them with design parameters and data measured with standard instruments. Discussion about results is also included in that section. Finally, we summarize the main conclusions in the last section.

2. Material and methods

2.1 General principles of sub-pixel tracking

Objects in nature present a wide variety of illumination levels. Binary thresholding on a digital image provides the number of pixels whose luminance value is equal or lower than a selected value. Result of this operation is a binary image with white blobs on a black background. The appearance of this image is directly connected with the object geometry and the illumination structure but, in the discretization and binarization processes, continuous shadows and profiles are broken and obtained borders show a pseudo-arbitrary profile.

Any movement of the object, even the smallest one, will change the scene brightness distribution and, consequently, the borders in the binarized digital image provided that the resolution of the pixel array is high enough. Detection of the changed pixels provides information of movement at a sub-pixel scale [8].

Let us consider a binary object like the one in Fig. 1. When the object is captured by a discrete camera sensor array, empty sensors are not giving response (pixel value = 0) while object areas that fall completely inside a pixel region give full response (pixel value = 1) and are detected. Notice that object borders represented by gray areas in Fig. 1(a) are not grid-shaped and only occupy a part of the sensor area. The response of these sensors is set to 0 or 1 depending whether the majority of the area is empty or occupied.

In Fig. 1(b), we depict the situation after discretization. Object profile has been clearly degraded and, although the contour resembles to the original object, the exact form is lost. When the object slightly moves, the occupied area ratio in some border pixels may change and so will do the contour. In Fig. 1(c), we depict the situation of the object in Fig. 1(a) after a lateral shift of 0.25 pixels. Notice that even with such small displacement, changes in the object shape between Figs. 1(b) and 1(c) are evident.

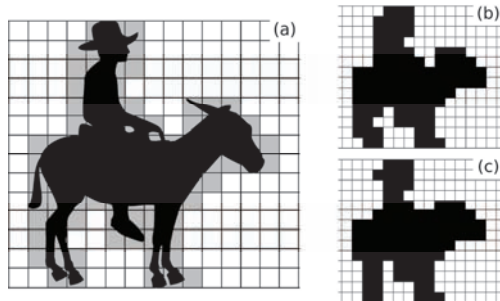


Fig. 1. (a) Binary object scene. Border pixels are marked in gray; (b) scene in (a) after spatial quantization; (c) scene in (a) after a horizontal shift of 0.25 px.

Detection of these changes may be useful to detect movements in the object. Unfortunately, real objects are not as clean as the one here depicted. Image binarization may produce a lot of noise because of sparkles, surface texture or non-uniform background. Moreover, changes in the binary images can be due to many factors, like shadows or illumination changes, and not only to object movements.

However, if the object is not randomly moving but vibrating, it exists a periodic pattern that can be detected and extracted from the noise and thus, the frequency of the movement can be obtained.

2.2 Multilevel thresholding

Up to this moment, we have only referred to binarized objects, while scenes are often captured in gray-scale or color. The simplest solution for this problem is using binary scenes. This can be accomplished by attaching a binary target to the object or using saturated objects in the scene as targets. These techniques were successfully used in [10,11]. In those cases, the image borders were clearly located so information about the object trajectory was also obtained.

In general, these solutions are not always possible. Objects are usually more complex and present a relatively wide dynamic range. Reduction of dynamic range in images is always problematic since usually appear false contours that can distort the original target shape and mask the movement. Thus, some criteria must be followed in order to obtain a suitable binary image. By simplicity, we will consider gray scale images, although the concepts can be easily extended to color scenes.

The first approach to gray scale images consist of reducing them to binary images by selecting a proper thresholding level according to the histogram, statistical values (maximum, minimum, median...) or any other criterion. Nevertheless, we would like to underline that we are looking for sub-pixel movements, so changes may be only perceptible in small bright sparkles, middle grays or dark areas. Therefore, it is difficult to guess which gray levels will be affected.

Instead of making models and predictions about illumination changes due to movement, we propose here to explore pixel changes at different levels simultaneously. Therefore, a multilevel threshold would be a convenient approach.

If the object vibrates, it is very likely that several brightness levels are affected by this vibration and thus, redundant information can be obtained from them. The remaining levels will carry useless information so that the final effect is a noise background that degrades the power spectrum. An adequate composition of the power spectra from all levels may enhance the frequency peaks corresponding to the vibration and clearly detect the vibration frequency.

Therefore, our proposal is to threshold each frame in different levels. The variation in the number of active pixels with respect to the first frame is analyzed for all the levels and the

obtained information is then analyzed and composed in order to determine the main vibration modes and cancel out the noise [12].

Obviously, the maximum information is obtained when all levels in the image are used. Nevertheless, this leads to inefficient algorithms both in time and memory resources. Proper selection of the levels to be analyzed will accelerate the algorithms and also increase the signal to noise ratio. The easiest option is to take a reduced number of levels between the minimum and the maximum. In all cases here analyzed, we selected 8 levels equally spaced. Some trials were made with more levels, but no relevant information was added. We also tried with 4 levels, but in some experiments the vibration was lost, so finally 8 levels were selected.

Selection of the number of levels is arbitrary and depends very much on the scene illumination and object reflectivity. One can take advantage from a special illumination or from some details that are more likely to change with the movement and, therefore, make a specific multilevel threshold for that scene: in controlled environments one can always make some areas brighter or force some sparkling points on the moving surface in order to facilitate the analysis. Unfortunately, this is not always possible and thus the multilevel thresholding has to be adapted to the particular experimental setup.

Once the thresholding is accomplished, the process consists of counting the white pixels in each binarized level and compare this number with the corresponding one of the same level in the first frame. This way we obtain the pixel variation through the sequence. At the end of the process, the different signals obtained for each level are composed in order to obtain a single result from the measurement. This composition makes the technique more robust since enhances very much the common peaks while cancels out random noise. Therefore, the method provides accurate results even in presence of strong noise.

2.3 Selection of a region of interest (ROI)

The proposed method only pretend to detect the vibration frequency, but not tracking the object. Since it is based on the summation of all the pixel values inside a binarized area specific location of each pixel position is lost. Additionally, only few pixel changes are due to the movement and noise or undesired changes in the scene may mask the vibration signal.

For this reason, we recommend taking a ROI as small as possible around a point where the movement has more probabilities to be detected which implies making some general hypothesis about the object dynamics. This way, we exclude all parts in the scene that do not add relevant information and the ratio between pixel changes due to movement and background noise is also increased. Notice that in the experiments shown below, all ROIs are smaller than 40x40 pixels.

Since a multilevel threshold will be performed on a relatively small area, one must be sure that in the area selected the histogram is wide enough to guarantee the presence of several gray scale levels carrying different information can be analyzed. As it happened above, proper illumination will contribute very much to the success in the measurement.

2.4 Materials and experimental procedure

The method just proposed has been proven by two lab experiments consisting of the detection of vibrations parallel and perpendicular to the image plane, respectively. The first case was accomplished with a tuning fork and, for the second, we used a loudspeaker membrane. In Figs. 2(a) and 2(b), we show picture of the specimens measured. Images were taken in color but only the green channel was considered. As we explained before, only 8 binarized levels are considered here.

In order to show the performance of the method in a more general case, we took the setup outside the lab and measured the main vibration mode of a small structure consisting of a 6.6 m long bridge passage connecting two parts of a building, as can be seen from Fig. 2(c).

In all cases, we used a CASIO Exilim EX-ZR1000 pocket camera [13], which was able to record video at different high-speed rates from 120 to 1000 frames per second (fps), with varying resolutions from 640×480 for the lowest temporal rate to 224×64 px for the highest. This camera stores the video sequence in JPEG-AVI format, so it introduces some noise in the

sequence that will appear as random dots after binarization and thus will not affect the vibration measurement. In order to avoid vibrations coming from pressing and releasing the camera shutter, the first three seconds of the sequence have been always rejected.

The frequency response of the camera was checked with a stroboscopic light. We observed that there are some inaccuracies in the acquisition speed, so the peaks present a wide basis. Anyway, the error in the peak location was below 1% so we considered this camera accurate enough for our proposal.

For the lab experiments, the camera was set 75 cm far from the objects to be measured. Illumination in both cases was accomplished with a 50 W LV halogen lamp with dichroic reflector. The lamp was connected to a stabilized DC power supply in order to avoid the detection of the AC cycle (100 Hz). The illumination was oblique from an angle of 30-45 degrees with respect to the object-camera axis. The camera was set to 1000 fps for both experiments.

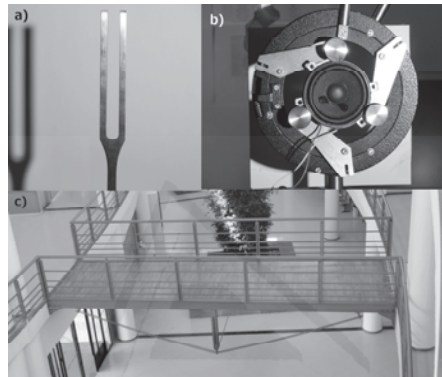


Fig. 2. Pictures of the specimens under analysis: (a) tuning fork; (b) loudspeaker membrane; (c) bridge passage.

For the bridge measurement, the camera was located at the same level than the bridge, at the right lateral corridor around 15 m from its center, outside the photo limits in Fig. 2(c). The oscillation was recorded by using the 120 fps mode [13]. In this case, the ambient illumination was enough for the experiment so no additional light sources were used.

3. Results and discussion

3.1 Measurement of vibrations in a controlled environment

As we pointed before, for the first experiment, the vibration of a tuning fork depicted in Fig. 2(a) was registered at 1000 fps. We hit the fork with a rubber hammer and then captured the sequence. The first 3 seconds of the video were ignored to avoid interferences from the vibrations coming from the camera operation, and the following 1000 frames were processed. The captured video is shown in [Media 1](#). In order to reduce the noise and accelerate the calculation, the analysis was performed on a small region of interest (ROI), as can be appreciated in Fig. 3.

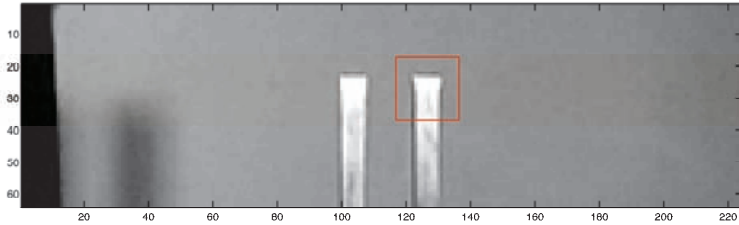


Fig. 3. Arms of a vibrating tuning fork and ROI analyzed. Notice that ROI size is 18×17 px. (Media 1)

The image inside the ROI is thresholded by eight different equidistant levels from the minimum to the maximum brightness levels and so obtained binary sequences are independently analyzed. In Fig. 4, we show the 8 binary levels for the first frame of the analyzed sequence.

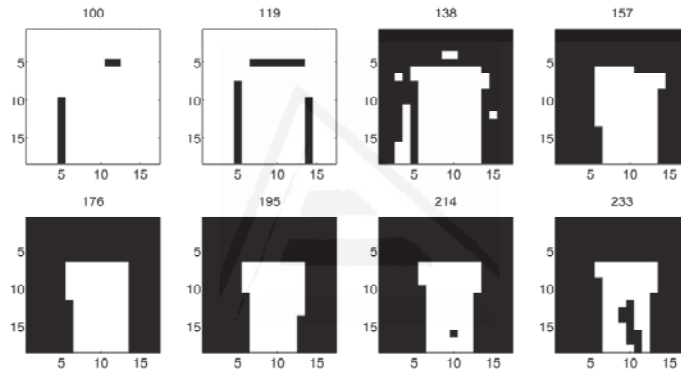


Fig. 4. Binary levels thresholded for the ROI in Fig. 2. Above each image, we write the gray threshold level.

The analysis consists of taking each of the binary sequences, counting the variation of active of pixels with respect to the first frame and performing a Fourier transform. In Fig. 5(a), we show the percentage of pixel variations relative to the ROI size (18×18 px) for each thresholded level. Notice that in all levels except level 2, the variations are less than 5% i.e. 16 px. In Fig. 5(b), we show the Fourier transform of each of the eight signals. In majority of levels, a frequency of 483 Hz is clearly detected. The tuning fork has a design frequency of 480 Hz, but measurements with a microphone showed that its real frequency peak is 481,9. Considering that the accuracy of our measurement is of ± 1 Hz and inaccuracies in the acquisition rate from the low-end camera we can conclude that our measurement provides a correct result, with an error below 0,5%.

Results obtained from the Fourier transforms can be combined in order to enhance the peaks and reduce or even cancel the noise. In what follows, we will just consider the sum of the peaks, although more sophisticated combinations can be proposed and developed.

In the second experiment, the vibration of a loudspeaker membrane is determined. The loudspeaker in Fig. 6 is connected to a computer and a two-frequency sound (317 and 412 Hz) is generated. The vibration of the loudspeaker membrane is captured with a microphone and the camera (see Media 2). Each result from the microphone and the camera represented in Fig. 7 have been normalized to its respective peak value at 317 Hz to allow better comparison between power spectra.

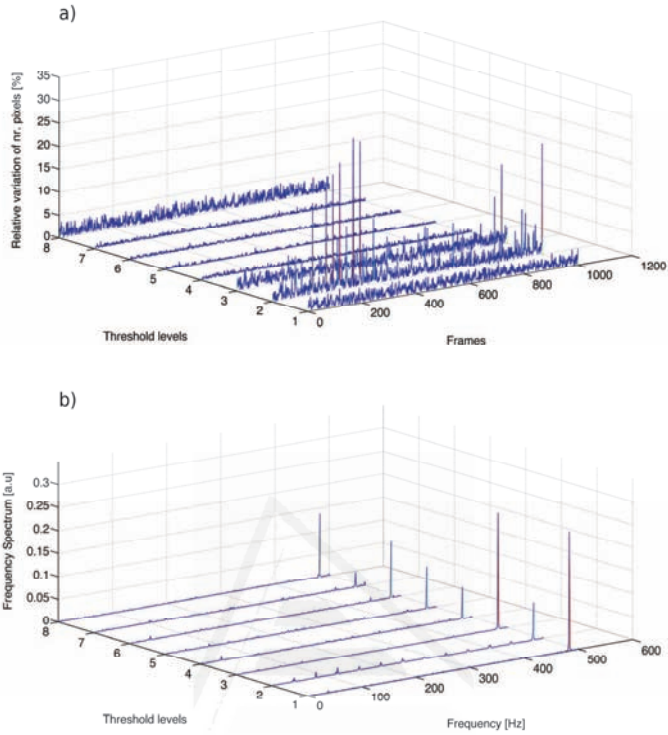


Fig. 5. a) Relative variation with respect to the first frame (absolute value) of the pixel number.
 b) Fourier transform of the signals in a).

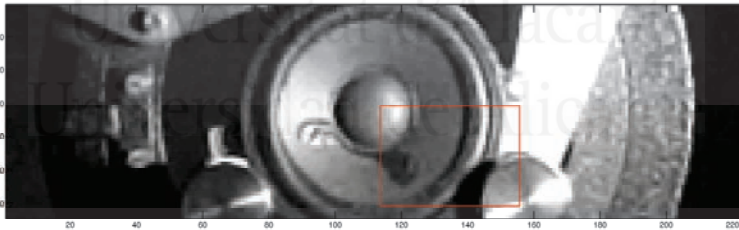


Fig. 6. Membrane of a vibrating loudspeaker and ROI analyzed. Notice that ROI size is 17×36 px (Media 2)

Notice that both the camera and the microphone detect the two main frequencies in the loudspeaker and even a third one that may be due to membrane distortions. Nevertheless, the relative height between peaks registered from the microphone is different than that from the camera. The video technique only counts pixels so peak height is not directly connected to any physical magnitude. Therefore, sensitivity to frequencies may be different to those obtained by other methods.

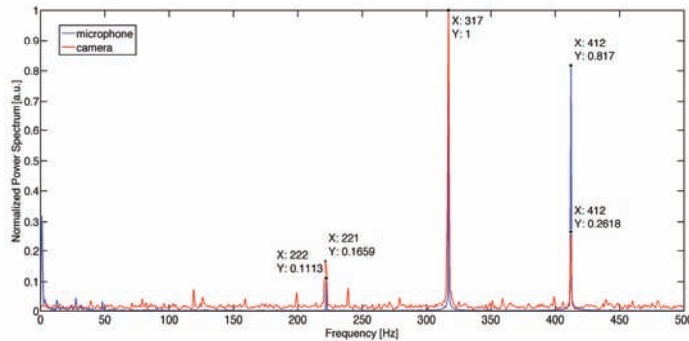


Fig. 7. Normalized frequency spectra obtained by analyzing the number of pixels variation (camera) in red and the sound intensity (microphone) in blue measured from the loudspeaker membrane.

As we said in the previous section, we must remind here that successful results depend very much of the ROI selection. In the case of the tuning fork, the selection is obvious since it is expected that at the fork end the movement amplitude to be maximum. Notice also that the selected ROI also offers high contrast and the eight levels carry different information, thus increasing the possibilities of a correct vibration measurement. In the case of the loudspeaker, the contrast through the diaphragm is relatively low. Only in the lower part, where we can compare the membrane movement with the static holder, which appears brighter, the correct frequencies were found.

Images with low contrast usually present few differences between levels, and thus, the redundancy is lost. In those cases, the presence of the image noise will probably mask the vibration frequency. In the second experiment, this happens for the highest frequency that is lost except for the ROIs selected in the half-lower part of the scene.

3.1 Measurement of vibrations in a real structure

After these lab experiments, the method was also tested on a passage bridge inside one building of the University of Alicante, as can be seen in Figs. 2(c) and 8(a). The bridge was excited by a person jump in the center and its main vibration mode was measured with the camera (see Media 3) and a monoaxial accelerometer located at the center of the bridge. We must point that the signal from the accelerometer was approximately selected two and a half seconds after the impact in order to avoid transient effects and to clearly distinguish the main frequency.

A small ROI in the center of the bridge is selected as can be seen in Fig. 8(a). Since the number of pixels that may change their status is very low, a very small window of 13x15 pixels must be selected in order to improve the signal-to-noise ratio. In Fig. 8(b), we also show the obtained accelerometer signal, together with the temporal window analyzed.

In Fig. 9, we present the frequency measured with the accelerometer and the camera. Results show that frequency registered by both devices is nearly the same. There are some discrepancies regarding the peak basis, where the accelerometer detects some secondary peaks that are lost in the video analysis. However, the main mode is clearly detected.

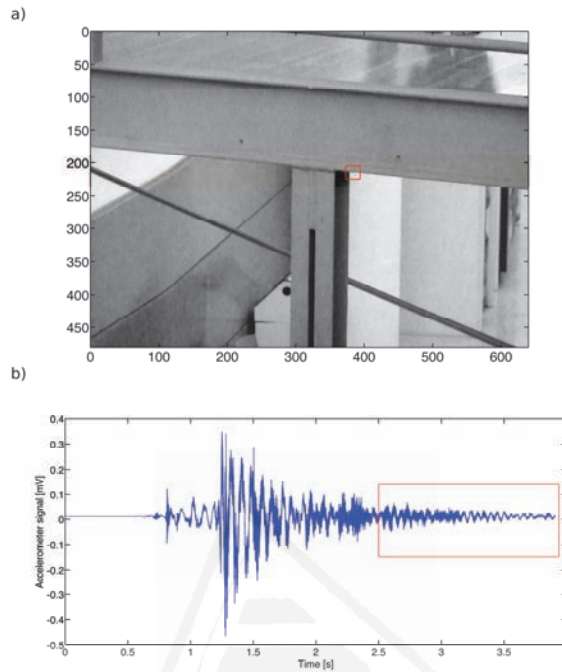


Fig. 8. a) Frame view of the bridge and ROI selected 13×15 px. (Media 3); b) Accelerometer signal and time window analyzed.

We would like to emphasize that the video sequence was taken just using the camera and the tripod, with no wires or additional lamps. On the contrary, the setup for the accelerometers required connection to a power supply, an acquisition module connected to a laptop computer and a wired accelerometer. Although the setup for this experiment is not very complex, it results, indeed, much more ostentatious than our proposed setup.

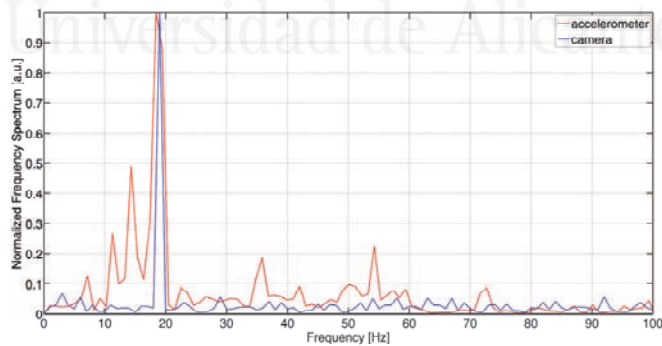


Fig. 9. Normalized frequency spectrum obtained from the camera and the accelerometer.

4. Conclusions

In all exposed experiments, we show that it is possible to measure the vibrations of an object provided that the temporal video resolution is high enough. Notice that the spatial resolution does not play an important role, since the managed ROIs are really small. Thus, the method can be easily implemented with a low cost camera, as we have also demonstrated here.

The method provides good results despite being limited to only measure the main frequency peaks. Although other devices can provide more complete results, it is also true that the setup and calculation complexity makes our method really cost-effective even for preliminary frequency tests.

Our proposal can be very much improved by using a better camera. The one we used here has limited capabilities since it is low-end device. Majority of laboratory cameras record video sequences without compression, and thus, images are less noisy. Additionally, they allow increasing the acquisition speed at the cost of reducing the resolution in real-time [14]. This way, one can adapt the Nyquist limit of the camera to the maximum expected frequency without changing the algorithm and avoid aliasing effects. In the camera here used both options (compression algorithms and acquisition speed) were limited by the hardware. In any case, results were satisfactory in all experiments.

It is also possible further explore and optimize the multi-level threshold and the combination between the different levels. An algorithm for automatically determining the size and location of the region of interest will also improve the method very much. Additionally, future developments could include statistical analysis of the image in order to obtain information about displacement of the pixels in the ROI, and, from that, estimate the vibration amplitude of the specimen under analysis.

Regarding the applications, we have shown in the lab the two most typical cases of vibrations (bar and membrane vibration). We have also shown that the method is easily scalable and can be used to measure the main vibration mode of a real structure without using any contact device and from several meters of distance.

In the presented case, we used a pocket camera but professional cameras with large zoom lenses can extend the range of application up to several hundreds of meters. Our proposal does not require of wires, laser probes or object attachments in the specimen to be measured. It also does not require special illumination conditions, provided that image contrast is high enough. Because of this and according to our results, we believe that the method is versatile and can be a reliable alternative to traditional vibrometry methods.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support of the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad through the project BIA2011-22704 and the Generalitat Valenciana through the projects GV/2013/009 and PROMETEO/ 2011/021. A. B. Roig acknowledges a grant from Cajamurcia.

Reunido el Tribunal que suscribe en el día de la fecha acordó otorgar, por _____ a la Tesis Doctoral de Don/Dña. Ana Belén Roig Hernández la calificación de _____

Alicante de de

El Secretario,

El Presidente,



UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Comisión de Doctorado

Universitat d'Alicant
Universidad de Alicante

La presente Tesis de Dña. _____ ha sido registrada con el nº _____ del registro de entrada correspondiente.

Alicante _____ de _____ de _____

El Encargado del Registro