

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

FACULTAD DE CIENCIAS



DEPARTAMENTO DE ÓPTICA

**CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE  
DISPOSITIVOS CCD Y APLICACIONES**

Tesis Doctoral

Memoria de Doctorado

Antonio Manuel Pozo Molina

Licenciado en Ciencias Físicas y Diplomado en Óptica y Optometría

Granada 2008

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Antonio Manuel Pozo Molina  
D.L.: Gr. 2223-2008  
ISBN: 978-84-691-6780-9



# **CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE DISPOSITIVOS CCD Y APLICACIONES**

Director de la Tesis

Fdo.: Dr. Antonio Manuel Rubiño López  
Catedrático de Escuela Universitaria  
Departamento de Óptica  
Universidad de Granada



**D. Antonio Manuel Rubiño López**, Doctor en Ciencias Físicas, Catedrático de Escuela Universitaria del Departamento de Óptica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada,

INFORMA:

Que el trabajo de investigación que se presenta en esta Memoria, titulado **“CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE DISPOSITIVOS CCD Y APLICACIONES”**, ha sido realizado bajo mi dirección en el Departamento de Óptica de la Universidad de Granada por el Licenciado en Ciencias Físicas y Diplomado en Óptica y Optometría D. Antonio Manuel Pozo Molina para optar al grado de Doctor por la Universidad de Granada.

Fdo.: Dr. Antonio Manuel Rubiño López  
Catedrático de Escuela Universitaria



Memoria presentada para optar al grado de  
Doctor por la Universidad de Granada.

Fdo.: Antonio Manuel Pozo Molina





El tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad de Granada:

**Presidente:** Dr.

**Primer Vocal:** Dr.

**Segundo Vocal:** Dr.

**Tercer Vocal:** Dr.

**Secretario:** Dr.

Realizado el acto de defensa y lectura de la tesis el día            de  
de 2008 en Granada, acuerda otorgarle la calificación de



## **Agradecimientos**

Deseo expresar mi más sentido agradecimiento, en primer lugar, al Dr. Rubiño López, por brindarme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral y llevar a cabo la dirección de la misma, por su orientación y ayuda en el montaje de los dispositivos experimentales, por sus consejos y disponibilidad en todo momento y, en definitiva, por su gran calidad humana y amabilidad, que han hecho sentirme muy a gusto trabajando a su lado.

Agradezco también a los doctores Campos Acosta y Pons Aglio, del Departamento de Metrología del Instituto de Física Aplicada (C.S.I.C., Madrid), que me hayan permitido utilizar los laboratorios para realizar una parte de las medidas presentadas en esta memoria.

A mis padres, Trinidad y Antonio, a quienes debo todo lo que soy; por estar siempre a mi lado, por su confianza en mí, por sus consejos, por su cariño y apoyo incondicionales. Y a mi hermano David, por los ánimos que siempre me ha dado.

A mi esposa Ana, por su confianza en mí, su apoyo y su paciencia, especialmente en la parte final de redacción de la tesis, en la que el trabajo ha ocupado la mayor parte de mi tiempo.

Me gustaría también agradecer, finalmente, al Dr. Pérez Ocón, las fructíferas (¿?) conversaciones que hemos mantenido sobre el uso del término “MTF” aplicado a detectores matriciales. De cualquier manera, he hecho caso omiso a sus sugerencias. Creo que sería algo atrevido por mi parte cambiar ¡60 años de historia y terminología científica! Le dedico, pues, a mi amigo Paco, el apartado de “Antecedentes” de la presente memoria. Espero (aunque creo que en vano), que a partir de ahora ya no vuelva a insistirme más sobre este tema.



*A mis padres, Trinidad y Antonio.*

*A mi hermano David.*



*A mi esposa Ana.*





# ÍNDICE

<b>1. PRESENTACIÓN</b> .....	1
<b>2. RESUMEN</b> .....	7
<b>3. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
3.1. Principios generales de funcionamiento del detector CCD .....	11
3.2. Caracterización óptica de detectores CCD mediante el fenómeno <i>speckle</i> .....	14
3.3. Antecedentes .....	16
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	23
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	25
<b>6. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</b> .....	27
<b>7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	29
7.1. De la comparación de dos métodos de medida de la MTF de detectores CCD basados en la generación de patrones de moteado láser ( <i>speckle</i> ).....	29
7.2. De las mejoras propuestas para evaluar la MTF de detectores CCD mediante el método <i>speckle</i> con rendija simple .....	32
7.3. De la caracterización óptica de lentes oftálmicas mediante la MTF a partir de patrones <i>speckle</i> .....	36
7.4. De la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método <i>speckle</i> .....	39
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	43
<b>9. PERSPECTIVAS</b> .....	45

<b>10. REFERENCIAS</b> .....	47
<b>ANEXO I</b> .....	55
<b>ANEXO II</b> .....	79

# 1. PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

La presente Tesis Doctoral está estructurada siguiendo las recomendaciones de la normativa vigente de los Estudios de Tercer Ciclo y del Título de Doctor por la Universidad de Granada, de 26 de septiembre de 2005, para la presentación de tesis doctorales como reagrupamiento de trabajos de investigación publicados por el doctorando.

Esta memoria incluye, por este orden, los siguientes capítulos: un resumen de la misma, introducción, justificación, objetivos, dispositivo experimental, discusión conjunta de los resultados obtenidos en los distintos trabajos, conclusiones, perspectivas, referencias, un Anexo I donde se incluyen los artículos publicados y, finalmente, un Anexo II donde se recogen los primeros resultados de un artículo en proceso de realización.

La presente memoria se basa en cuatro artículos originales que constituyen la producción científica de una línea de investigación centrada en la caracterización óptica de dispositivos CCD mediante el método de moteado láser (en inglés, *speckle*), en términos de la Función de Transferencia de Modulación (*Modulation Transfer Function*, MTF). De los cuatro artículos presentados a continuación, los tres primeros están publicados (incluidos en el Anexo I), y el cuarto se encuentra en proceso de realización (incluido en el Anexo II). Esta tesis doctoral se basa, pues, en las siguientes publicaciones:

- **Pozo A. M.**, Rubiño M., “Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer function of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle”, *Appl. Opt.* 44(9), 1543-1547 (2005).

- **Pozo A. M.**, Rubiño M., “Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern”, *Appl. Opt.* 44(36), 7744-7748 (2005).

- **Pozo A. M.**, Ferrero A., Rubiño M., Campos J., Pons A., “Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method”, *Opt. Express* 14(13), 5928-5936 (2006).

- **Pozo A. M.**, Fernández-Oliveras A., Rubiño M., “Influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método *speckle*”, (en proceso de realización).

Otras publicaciones relacionadas con el trabajo presentado en esta memoria son las siguientes:

- **Pozo A. M.**, Rubiño, M. “Caracterización óptica de cámaras CCD para medida del color”, *Opt. Pura Apl.* 37(1), 97-100 (2004).

- Fernández-Oliveras, A., **Pozo A. M.**, Rubiño M., “Análisis de la variación espectral de la MTF de videocámaras CCD mediante patrones de moteado láser”, *Opt. Pura Apl.* 41(3), 221-225 (2008).

## **Comunicaciones a Congresos**

Algunos resultados parciales pertenecientes a este trabajo se han presentado en los siguientes congresos y reuniones científicas:

- VII Reunión Nacional de Óptica. Santander (España), 2003.

- II International Topical Meeting on Physiological Optics. Granada (España), 2004.

- VII Congreso Nacional de Color. Pamplona (España), 2004.

- 10th Congress of the International Colour Association, AIC Colour 05. Granada (España), 2005.

- VIII Reunión Nacional de Óptica. Alicante (España), 2006.
- XXXI Reunión Bienal de Física. Granada (España), 2007.
- VIII Congreso Nacional del Color. Madrid (España), 2007.
- 2nd Meeting, Visual Optics Spanish Network. Murcia (España), 2007.
- Seminario de la Red Temática “Ciencia y Tecnología del Color”. Madrid (España), 2007.
- 4th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV). Barcelona (España), 2008.

### **Otras publicaciones y congresos**

Los siguientes trabajos constituyen los primeros resultados de un nuevo método que estamos desarrollando actualmente para caracterizar dispositivos ópticos, basado en la generación de patrones de puntos aleatorios presentados en la pantalla LCD de un ordenador portátil:

- **Pozo A. M.**, Fernández-Oliveras, A., Rubiño M., “Evaluación de la calidad óptica de un sistema multispectral de adquisición de imágenes usando patrones de puntos aleatorios”, *Opt. Pura Apl.* 41(3), 215-219 (2008).

- **Pozo A. M.**, Fernández-Oliveras A., Rubiño M., “*Random-pattern characterization of imaging systems used in Colorimetry*” en “Ciencia y Tecnología del Color. Seminario 2007 de la Red Temática”, (Editores: Joaquín Campos Acosta y Rafael Huertas Roa, Red Temática “Ciencia y Tecnología del Color”, Granada, España), pp. 27-30, 2007.

- *4th European Meeting in Visual and Physiological Optics. Heraklion (Grecia), 2008.* En este congreso se ha presentado un método para evaluar la MTF de lentes oftálmicas, basado en un filtro sintonizable de cristal líquido y un patrón aleatorio presentado en la pantalla LCD de un ordenador portátil.

## **Financiación**

La presente tesis doctoral ha sido parcialmente subvencionada por:

- Beca de Investigación con cargo al Proyecto de Investigación “Caracterización óptica de un sistema de medida, con baja incertidumbre, de radiancia espectral de fuentes inhomogéneas, basado en una cámara CCD”, de referencia DPI2001-1174-C02-02; entidad financiadora: C.I.C.Y.T.-FEDER; entidades participantes: Departamento de Óptica (Universidad de Granada) y Departamento de Metrología (C.S.I.C., Madrid).

- Contrato de trabajo para llevar a cabo un trabajo de investigación dentro del proyecto “Caracterización óptica de un nuevo espectrorradiómetro 2D. Aplicación al análisis espectrofotométrico y colorimétrico de fuentes luminosas y muestras no uniformes”, de referencia FIS2004-06465-C02-02; entidad financiadora: C.I.C.Y.T.-FEDER; entidades participantes: Departamento de Óptica (Universidad de Granada) y Departamento de Metrología (C.S.I.C., Madrid).

- Los dos proyectos mencionados anteriormente, junto con el proyecto vigente “Caracterización óptica de superficies y dispositivos ópticos mediante patrones aleatorios”, de referencia FIS2007-66671-C02-02, entidad financiadora: M.E.C., entidades participantes: Departamento de Óptica (Universidad de Granada) y Departamento de Metrología (C.S.I.C., Madrid), han permitido disponer de la financiación necesaria para la adquisición del material e instrumentación de laboratorio utilizados en el dispositivo experimental con el que

se han hecho todas las medidas, cuyos resultados se recogen en las publicaciones en las que se basa la presente memoria.





## 2. RESUMEN

Las numerosas e interesantes características del detector CCD, como parte integrante de un sistema optoelectrónico, han propiciado su uso en muy diversos ámbitos, como el doméstico, técnico o científico. En cambio, el continuo desarrollo y mejoras de detectores para diferentes aplicaciones sólo es posible si se dispone de métodos de caracterización fiables para evaluar su calidad óptica y, a ser posible, con baja incertidumbre.

La Función de Transferencia de Modulación (*Modulation Transfer Function*, MTF) es uno de los parámetros más importantes en la determinación de la calidad óptica de un detector, y caracteriza la respuesta en frecuencia espacial del mismo. Sin embargo, y por simplicidad, la mayoría de las veces se hace uso de sistemas ópticos para formar la imagen de un determinado patrón sobre el detector, conduciendo a una caracterización no rigurosa y poco fiable del mismo; en efecto, estos métodos mezclan las cualidades del detector con las características del sistema óptico utilizado.

El objetivo principal de la presente memoria es la caracterización óptica de detectores CCD mediante el método de moteado láser (en inglés, *speckle*), en términos de la MTF. Este método permite caracterizar el detector independientemente del sistema óptico del que esté compuesto el sistema optoelectrónico en cuestión. Tomando como punto de partida los trabajos de Boreman (Boreman *et al.*, 1990) y Sensiper (Sensiper *et al.*, 1993), se han comparado ambos métodos; se ha mejorado el método de Boreman (Boreman *et al.*, 1990) proponiendo dos correcciones que permiten evaluar la MTF de detectores CCD con baja incertidumbre; finalmente, se han desarrollado dos aplicaciones para caracterizar lentes oftálmicas y videocámaras CCD.

En primer lugar, pues, se han comparado dos métodos de medida de la MTF de un detector CCD (basados en el fenómeno *speckle*) utilizando dos aberturas distintas. Para ello se ha utilizado un láser He-Ne y una esfera integradora para producir el patrón *speckle*. Una rendija simple o doble

situada en la abertura de salida de la esfera, permite determinar el contenido de frecuencias espaciales del patrón *speckle*. Los resultados de este trabajo han permitido mostrar las ventajas e inconvenientes de cada método. Cuando se utiliza una rendija simple, sólo es posible medir la MTF para frecuencias espaciales inferiores a la frecuencia de Nyquist del detector; en cambio, la MTF puede obtenerse a partir de una única posición fijada para el detector y, por tanto, es un método rápido. En el caso de utilizar una rendija doble, es posible obtener la MTF del detector en un rango de frecuencias espaciales casi el doble que utilizando como abertura una rendija simple, lo que permite una caracterización más completa del detector; sin embargo, tiene el inconveniente de ser un método de medida más lento debido a la necesidad de desplazar el CCD para calcular el valor de la MTF a las frecuencias espaciales deseadas. La diferencia encontrada en la MTF entre ambos métodos, en términos de la desviación cuadrática media (*root mean square*, rms) es 0,046 (4,6%). Estos resultados se recogen en el artículo “Pozo A. M. y Rubiño M., *Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer function of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle*, *Appl. Opt.* 44(9), 1543-1547 (2005)” incluido en el Anexo I de la presente memoria.

Constituye una principal aportación de esta memoria, entre otras de interés, el análisis de factores experimentales que afectan a la determinación de la Densidad Espectral de Potencia (*Power Spectral Density*, PSD), a partir de la cual se obtiene la MTF del CCD, utilizando como abertura una rendija simple. Los resultados se recogen en el artículo “Pozo A. M., Ferrero A., Rubiño M., Campos J., y Pons A., *Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method*, *Opt. Express* 14(13), 5928-5936 (2006)” incluido en el Anexo I de esta memoria. En dicho trabajo, además, se proponen y validan experimentalmente dos correcciones que permiten determinar la MTF de un detector CCD con baja incertidumbre, una para la región de bajas frecuencias espaciales y otra para la región de altas frecuencias espaciales. La corrección en la región de bajas frecuencias espaciales permite atenuar los elevados valores que se obtienen en la PSD debidos a la no-uniformidad de respuesta del CCD y a la no-uniformidad del campo originado por la rendija

simple. En la región de altas frecuencias espaciales los resultados muestran que la distancia entre el CCD y la abertura es crítica e influye significativamente en la determinación de la MTF: una variación de 1 mm en la distancia entre el CCD y la abertura origina una desviación rms superior al 10%. Esta corrección permite minimizar el error experimental cometido al establecer la distancia entre el CCD y la abertura, disminuyendo la desviación rms hasta el 0,43%.

Finalmente, se han desarrollado dos aplicaciones del método, recogidas en los artículos “Pozo A. M. y Rubiño M., *Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern*, *Appl. Opt.* 44(36), 7744-7748 (2005)” y “Pozo A. M., Fernández-Oliveras A., y Rubiño M., *Influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método speckle*, (en proceso de realización)”, incluidos en el Anexo I y Anexo II de la presente memoria, respectivamente. La primera aplicación ha consistido en la caracterización óptica de lentes oftálmicas de diferentes fabricantes. Como segunda aplicación, y dada la creciente expansión del uso de videocámaras en numerosas aplicaciones, cabe destacar el análisis que se presenta sobre la influencia de diferentes tarjetas capturadoras de vídeo en la MTF de una videocámara CCD.

El dispositivo experimental y procedimiento presentados en esta memoria para la caracterización de detectores CCD en términos de la MTF, permitirían evaluar, con baja incertidumbre, la calidad óptica de detectores (constituidos por matrices de elementos fotosensibles lineales o de área) de muy diversos sistemas optoelectrónicos, como cámaras y videocámaras digitales, cámaras web, cámaras de teléfonos móviles, sistemas de videovigilancia, cámaras utilizadas en robótica y visión artificial, o instrumentos optométricos y oftalmológicos, entre otros.

## 2. *Resumen*

---

### **3. INTRODUCCIÓN**

#### **3.1. Principios generales de funcionamiento del detector CCD**

CCD (Charge-Coupled Device) es el término que hace referencia a la tecnología (o arquitectura) de semiconductor según la cual la carga eléctrica es transferida hacia áreas de almacenamiento de carga (Holst y Lomheim, 2007a). Debido a que los CCD fueron los primeros detectores de estado sólido que se fabricaron, hoy día se suelen utilizar términos como “cámaras CCD”, o “dispositivos CCD”. En lo sucesivo, nos referiremos con el término CCD al dispositivo optoelectrónico capaz de acumular, transportar y leer carga eléctrica, aunque estos dispositivos deberían denominarse propiamente “dispositivos de estado sólido con lectura tipo CCD”, o “cámaras de estado sólido con lectura tipo CCD”, ya que el término CCD se refiere, en rigor, al tipo de lectura. Como detector optoelectrónico, proporciona información sobre la distribución espacial de la irradiancia sobre el detector. Un detector CCD es, por tanto, un detector matricial, donde un conjunto de fotodetectores se distribuye uniformemente en un plano.

La tecnología CCD está basada en conexiones en serie constituidas por condensadores Metal-Óxido-Semiconductor (*Metal-Oxide-Semiconductor*, MOS). Estos condensadores se sitúan próximos entre sí de modo que, después de acumular la carga eléctrica, ésta pueda ser transferida de manera eficiente de uno a otro hasta el punto de lectura; dicha transferencia se realiza de forma secuencial para mantener la información de la carga que procede de cada condensador MOS. Las tres funciones básicas de esta tecnología son el almacenamiento de carga, la transferencia de carga y la conversión de la carga a un voltaje medible.

El proceso de fotodetección comienza cuando los fotones son absorbidos por la matriz de píxeles del CCD, generándose carga eléctrica en forma de pares electrón-hueco. En la etapa de almacenamiento de carga, ésta se almacena en los condensadores MOS. En la tecnología de detectores CCD de silicio, la puerta

(*gate*) está fabricada con polisilicio, el dieléctrico suele ser óxido de silicio, y el substrato semiconductor es silicio tipo *p*. Cuando se suministra una tensión positiva a la puerta, los condensadores MOS entran en el estado de “deplexión profunda” (*deep depletion*) (Theuwissen, 1996a), de manera que algunas cargas libres del substrato (huecos) son repelidas hacia el electrodo de tierra. Para restablecer el equilibrio, se genera una región en el semiconductor, y próxima al dieléctrico, denominada “región de agotamiento de carga”. El pozo de potencial que existe en dicha región es capaz de atrapar electrones. Cuando se genera carga en esta región se pasa al estado de “deplexión débil” (*weak depletion*) (Theuwissen, 1996a), en el que los electrones quedan confinados cerca de la interfaz  $SiO_2-Si$  debido al pozo de potencial. Esta carga se genera a partir del efecto fotoeléctrico interno que se produce cuando los fotones incidentes se absorben en el semiconductor del MOS. De esta manera, los condensadores MOS pueden almacenar carga (electrones). La cantidad de carga almacenada puede ser regulada variando el tiempo que se mantiene activo el estado de deplexión débil (tiempo de integración).

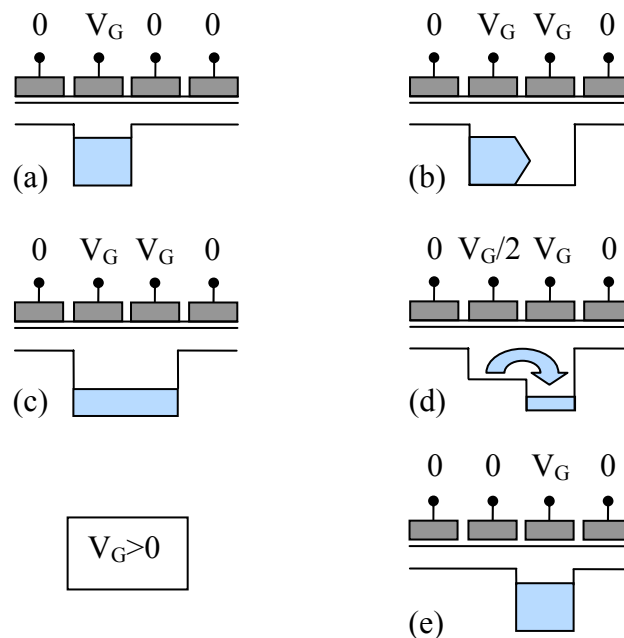


Figura 3.1: Transporte de carga en un CCD.

Para realizar el transporte de carga se aplican pulsos de tensión sobre las puertas. Generalmente, el número de puertas por celda varía entre dos y cuatro. La

manipulación sistemática y secuencial de la tensión aplicada a cada puerta permite transferir los electrones a la siguiente puerta; de esta manera se consigue transferir la carga hasta el punto de lectura. La figura 3.1 muestra cómo se transfiere la carga de un condensador MOS a otro (Theuwissen, 1996a). En ella se representan cuatro condensadores MOS, inicialmente (a) con todas las puertas sin polarizar, excepto la segunda, que se encuentra a 10 V; este condensador MOS es el que contiene en su pozo de potencial la carga que se va a transportar. Cuando la puerta del tercer condensador se polariza a 10 V (b), la carga se distribuye entre los dos pozos de potencial, pues éstos alcanzan el mismo nivel (c). Finalmente, la puerta del segundo condensador se polariza a 0 V (d, e), y como los electrones tienden a la mayor profundidad del pozo, éstos pasan del segundo al tercer condensador, completándose el transporte entre ambos. Es importante que los voltajes de las puertas del primer y cuarto condensador permanezcan a 0 V, ya que esto evita que el paquete de carga que se pretende transportar interfiera con otros paquetes o simplemente se pierda.

Formar una imagen con un CCD requiere transportar el paquete de carga hasta el punto de lectura a lo largo de un trayecto bidimensional. La repetición de este proceso resulta en un movimiento lineal del paquete de carga desde la celda original hasta el final de una fila. Con este propósito se han diseñado una serie de arquitecturas que pueden clasificarse como de “transferencia por marcos” (*frame-transfer*, FT), “entre líneas” (*interline-transfer*, IT), y “por marcos y entre líneas” (*frame-interline-transfer*, FIT) (Theuwissen, 1996b). En la figura 3.2 se representan estas tres arquitecturas. Las flechas indican en cada caso hacia dónde se realiza el transporte de carga. En las tres arquitecturas se puede distinguir entre dos tipos de celda: la celda fotosensible, que hace las veces de detector, y la celda de registro, que funciona como memoria y está apantallada para evitar la luz incidente. La diferencia entre las tres arquitecturas se encuentra en la disposición de estos dos tipos de celda. En las tres existe el llamado registro horizontal, hacia el que se va llevando de manera secuencial la carga y desde donde se realiza un transporte unidimensional directamente hacia el punto de lectura. Una vez que toda la carga en las celdas fotosensibles ha sido transferida a las celdas de registro, se pasa a integrar la siguiente señal.



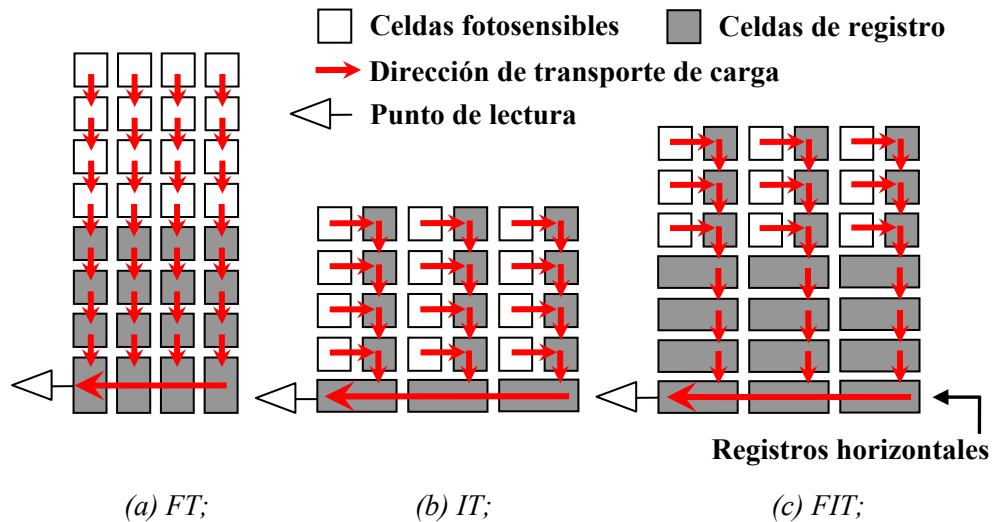


Figura 3.2: Arquitecturas de transporte de carga FT, IT y FIT.

La última etapa en la formación de un fotograma consiste en leer la carga que llega al punto de lectura (Holst y Lomheim, 2007b), donde hay un pequeño condensador conectado a un amplificador MOSFET de salida [amplificador integrado (*on-chip*)]. Este punto del CCD se conoce como “nodo sensible” (*sense node*). Este amplificador genera una tensión para cada píxel, proporcional a la carga transferida. Posteriormente, la señal es amplificada por un amplificador externo al sensor CCD [amplificador no integrado (*off-chip*)], y cuantizada por el conversor A/D de una tarjeta digitalizadora (*frame grabber*). El último paso de la lectura se suele realizar mediante un programa instalado en un PC que permite guardar y procesar los datos.

### 3.2. Caracterización óptica de detectores CCD mediante el fenómeno *speckle*

Un patrón de moteado láser o *speckle*, es la distribución aleatoria de intensidades que se produce cuando luz suficientemente coherente se refleja en una superficie rugosa o se propaga a través de un medio con fluctuaciones aleatorias del índice de refracción (Dainty, 1984). En la figura 3.3(a) se representa

un haz de radiación monocromática que incide sobre una superficie rugosa (en comparación con su longitud de onda) para reflejarse, posteriormente, de manera difusa. La onda resultante de la reflexión en un punto distante P sobre un plano  $\Pi$ , es la suma de muchas ondas coherentes, cada una proveniente de diferentes elementos microscópicos de la superficie rugosa. Los caminos ópticos de estas ondas pueden diferir en varias longitudes de onda. Las interferencias de estas ondas coherentes, pero desfasadas, producen como resultado un patrón de apariencia granular en el plano  $\Pi$  como el representado en la figura 3.3(b), denominado *speckle*. Las características del patrón *speckle* dependen tanto de la coherencia de la radiación incidente como de la rugosidad de la superficie.

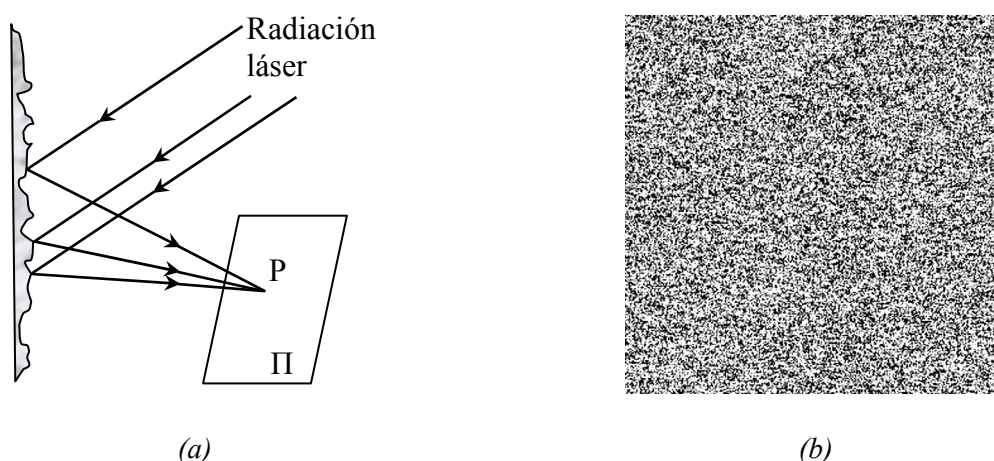


Figura 3.3: (a) Representación esquemática del proceso de formación de *speckle*, mostrando la incidencia de radiación láser sobre una superficie rugosa y (b) ejemplo de patrón *speckle* originado en el plano  $\Pi$ .

Una abertura situada a continuación de la superficie rugosa permite determinar el contenido de frecuencias espaciales del patrón *speckle*. De esta manera, y a partir de la distribución de intensidad del patrón *speckle*, es posible obtener la PSD (Goldfischer, 1965).

La MTF de un detector CCD se puede determinar mediante la ecuación (1), a partir de la PSD obtenida experimentalmente ( $PSD_{\text{salida}}$ ) del patrón *speckle*

registrado con el detector CCD y la PSD teórica ( $PSD_{entrada}$ ), que es conocida para la abertura en cuestión (Boreman y Dereniak, 1986). En la ecuación (1),  $\xi$  y  $\eta$  denotan, respectivamente, las frecuencias espaciales en las direcciones horizontal y vertical.

$$PSD_{salida}(\xi, \eta) = [MTF(\xi, \eta)]^2 PSD_{entrada}(\xi, \eta) \quad (1)$$

### 3.3. Antecedentes

Willard S. Boyle y George E. Smith realizaron el primer diseño del detector CCD en 1969, en *Bell Telephone Laboratories*; un año después lograron fabricar una primera versión del detector (Boyle y Smith, 1970). Desde entonces, el interés por este tipo de detector no ha hecho más que crecer en la comunidad científica. Se pueden establecer cuatro grandes grupos de aplicaciones: sistemas de imagen generales (como televisión o cámaras fotográficas digitales y videocámaras de uso doméstico), visión artificial, aplicaciones científicas y aplicaciones militares (Holst y Lomheim, 2007a). Existe abundante literatura sobre muy diversos aspectos de los detectores CCD, como el análisis y métodos de corrección de ruido (Ferrero *et al.*, 2006a) (Ferrero *et al.*, 2007), procedimientos de calibración radiométrica con baja incertidumbre (Campos, 2000) (Ferrero *et al.*, 2006b) o evaluación de su calidad óptica (Boreman y Dereniak, 1986) (Boreman *et al.*, 1990) (Sensiper *et al.*, 1993) (Pozo y Rubiño, 2005a) (Fernández-Oliveras *et al.*, 2008). Con respecto a este último punto, la MTF es uno de los parámetros más importantes en la evaluación de la calidad óptica de un detector, de un sistema óptico y, en general, de un sistema optoelectrónico. La MTF caracteriza la respuesta en frecuencia espacial del sistema, es decir, determina cómo de bien el sistema reproduce una escena en términos de la frecuencia espacial. Ofrece, por tanto, una información más completa que aquellos criterios que proporcionan solamente el valor de la resolución espacial límite de un sistema, como por ejemplo el criterio de Rayleigh (Strutt, 1879), ya que, además de dicho valor, la MTF incluye información sobre la calidad óptica del sistema en un rango de frecuencias espaciales.

Los conceptos relacionados con la Función de Transferencia Óptica (*Optical Transfer Function*, OTF) se desarrollaron muy lentamente (Williams y Becklund, 1989). Es importante notar que los conceptos y maneras de medir la OTF vinieron de numerosas fuentes y, la mayoría de ellas, independientes unas de las otras. Progresos sustanciales en el desarrollo de la OTF y su potencial utilidad tuvieron su comienzo en 1950. Desde entonces, la OTF se sigue utilizando como un parámetro importante en la evaluación, especificación y diseño de sistemas ópticos y optoelectrónicos.

El primer trabajo donde se analiza la imagen de un objeto con estructura periódica (líneas uniformemente espaciadas) es el de Strutt (Strutt, 1896). Frieser sugiere de forma explícita el uso de una función de transferencia óptica; este concepto es aplicado a la disminución de la amplitud de un patrón sinusoidal formado en una película fotográfica (Frieser, 1938). Selwyn desarrolla este concepto y lo aplica separadamente a una lente y a una película fotográfica (Selwyn, 1948). Lunerberg publica una discusión teórica detallada sobre la resolución de objetos con estructura periódica (Lunerberg, 1965).

La primera formulación teórica de la OTF mediante análisis de Fourier se encuentra en una serie de publicaciones de Duffieux a comienzos de 1935. Los resultados se recogen en su libro (Duffieux, 1946), donde se describe la imagen formada por un objeto bidimensional iluminado de forma incoherente. Muestra, además, que la teoría de Abbe de la formación de imágenes con radiación coherente puede ser reformulada en términos del análisis de Fourier; asimismo, extiende su teoría de formación de imagen para cualquier tipo de abertura y aberración. El trabajo de Duffieux jugó un papel crucial en la creación de una rama de la Óptica conocida hoy como Óptica de Fourier.

Ya que el módulo de la OTF, es decir, la MTF, se basa en la medida del contraste en la imagen de un objeto periódico, los ingenieros electrónicos encontraron un paralelismo entre este concepto y otras funciones de transferencia habituales en su trabajo diario. En este sentido, cabe destacar los trabajos de Schade y Elias (Schade, 1948) (Elias *et al.*, 1952) (Elias, 1953). En el primero de

ellos se analiza, mediante análisis de Fourier, la calidad de imagen de los primeros sistemas de televisión. Schade, un ingeniero que trabajaba en la evaluación de la calidad de lentes de televisión, desarrolla el concepto de disminución de contraste para una secuencia de subsistemas aplicando teoría de comunicaciones. Acomete, además, el cálculo y evaluación de las características de la imagen en sistemas optoelectrónicos e introduce el concepto de función de transferencia de una lente. El trabajo de Elias constituye una importante aportación en el campo de la OTF (Elias *et al.*, 1952), pero es interesante resaltar que, al igual que en el trabajo de Schade (Schade, 1948), el concepto de OTF se muestra en términos de funciones de entrada y salida, excluyendo toda referencia a la teoría de la Óptica Física. Asimismo, Elias propone analizar los sistemas ópticos mediante métodos matemáticos desarrollados originariamente para sistemas electrónicos, en términos de funciones de entrada y salida (Elias, 1953). Estas ideas fueron aceptadas por la comunidad científica y, de hecho, se siguen aplicando actualmente en la caracterización de sistemas optoelectrónicos (Holst, 2006) (Holst y Lomheim, 2007a).

Paralelamente al desarrollo de ideas y conceptos sobre la OTF, se comienzan a diseñar técnicas y construir dispositivos experimentales para su medida. Rosenhauer y Rosenbruch realizaron una interesante revisión sobre diferentes dispositivos experimentales para la medida de la OTF de lentes, la mayoría de ellos desarrollados durante la década de los 50 (Rosenhauer y Rosenbruch, 1967).

En contraste con la aproximación de entrada-salida de Schade y Elias (Schade, 1948) (Elias *et al.*, 1952) (Elias, 1953), Hopkins basa sus desarrollos de la OTF en el marco de la teoría de la Óptica Física, proporcionando, desde este nuevo enfoque, los fundamentos para el diseño y evaluación de sistemas ópticos (Hopkins, 1950) (Hopkins, 1955a) (Hopkins, 1956). En la década de los años 60 surgen, además, técnicas avanzadas de cálculo que contribuyen de forma notable al campo de la medida de la OTF, como el algoritmo de Cooley y Tukey (Cooley y Tukey, 1965). Lerman aplica por primera vez la transformada rápida de Fourier al cálculo de la OTF (Lerman, 1969).

En la década de los 50 surgen nuevos procedimientos para la medida de la MTF basados en el fenómeno físico de las interferencias. El origen de este método se encuentra en el trabajo de Hopkins (Hopkins, 1955b), donde desarrolla la teoría del método interferométrico y propone un interferómetro para medir la MTF de una lente. Marchywka y Socker aplican por primera vez técnicas interferométricas para calcular la MTF de un detector CCD (Marchywka y Socker, 1992). Son también de señalar los trabajos de Greivenkamp y Lowman (Greivenkamp y Lowman, 1994) y Hu (Hu *et al.*, 1999). La principal ventaja de los métodos interferométricos es que permiten proyectar el patrón sinusoidal directamente sobre el detector CCD, lo que hace posible caracterizar la matriz de detectores independientemente del objetivo de la cámara. En cambio, requieren montajes experimentales más o menos complejos y costosos. Así por ejemplo, el dispositivo experimental propuesto por Hu (Hu *et al.*, 1999), que permite variar de forma continua la frecuencia espacial mediante el giro de un espejo, tiene el inconveniente de que hay que calibrar el ángulo de giro del espejo en función de la frecuencia espacial; también se requiere un detector que se desplace en dirección perpendicular a la orientación de las franjas para medir la modulación. Además, dado el gran número de medidas que hay que realizar se hace necesaria la automatización del sistema, con el incremento de coste que ello supone.

Podemos considerar otro conjunto de métodos de medida de MTF de sistemas optoelectrónicos que emplean como patrón una fuente puntual, una fuente lineal o un borde inclinado. En estos casos, la MTF puede obtenerse a partir de la Función de Extensión de Punto (*Point Spread Function*, PSF), Función de Extensión de Línea (*Line Spread Function*, LSF) o Función de Extensión de Borde (*Edge Spread Function*, ESF). El origen de estos métodos aplicados a detectores se encuentra en los trabajos (Campana, 1977) (Park *et al.*, 1984) (Reichenbach *et al.*, 1991) (Lettington y Hong, 1993). Podríamos incluir también, en este grupo, aquellos métodos que utilizan como objeto patrones de barras o sinusoidales (Coltman, 1954). Este tipo de patrones también se ha utilizado en sistemas discretos, como son los detectores CCD (Lettington y Hong, 1993) (Sitter, Jr. *et al.*, 1995).

Un inconveniente de los métodos citados en el párrafo anterior es que no permiten evaluar la MTF del detector independientemente del sistema óptico. Además, es necesaria una cuidadosa alineación del objeto respecto de la matriz de píxeles del detector ya que, debido a la propia naturaleza del objeto (no aleatoria) y a la naturaleza discreta de la matriz de píxeles del detector, no son métodos espacialmente invariantes frente a traslación (*shift invariant*) porque no cumplen la condición de isoplanatismo. Es importante notar aquí que la definición convencional de OTF (o de MTF) para sistemas continuos (no discretos) está basada en la hipótesis de que el sistema bajo estudio es temporalmente invariante, y espacialmente invariante frente a traslación. La definición, por tanto, de OTF (y de MTF) para sistemas continuos no es válida, en rigor, para sistemas discretos, como ocurre en un detector que está compuesto por una matriz de elementos discretos como son los píxeles. La definición rigurosa de OTF y MTF para sistemas discretos y, en particular, para detectores matriciales, es desarrollada por Wittenstein (Wittenstein *et al.*, 1982). En este sentido, son también de destacar los trabajos (Park *et al.*, 1984) (Levi, 1983) (Feltz y Karim, 1990) (Friedenberg, 2000).

Por otra parte, en el caso de los métodos basados en la PSF y LSF se requiere una potente fuente de radiación. Además, en todos ellos es necesario un sistema óptico para formar la imagen del objeto sobre la matriz de píxeles del detector y, por tanto, la calidad del sistema óptico puede influir en la MTF resultante. Estos métodos, pues, no permiten determinar la MTF del detector independientemente del sistema óptico, sino solamente la MTF del conjunto (detector más sistema óptico). Otro inconveniente es que en los métodos basados en la PSF, LSF y ESF, la medida de la MTF está basada en la respuesta de una región limitada de píxeles del detector en vez de la matriz entera. De esta manera, en la MTF no queda reflejada la evaluación de la calidad de toda la matriz de píxeles.

Un nuevo método de medida de la MTF de detectores, propuesto por Boreman y Dereniak, resuelve las desventajas que presentan los métodos citados anteriormente (Boreman y Dereniak, 1986). En este trabajo, los autores generan

un patrón de “moteado láser” mediante un difusor (por transmisión) de sílice sobre el que se hace incidir radiación láser. Cuando se ilumina una superficie rugosa con radiación coherente se genera un fenómeno de interferencia múltiple que se traduce en un patrón de zonas claras y oscuras, de apariencia granular, denominado “moteado láser” o *speckle*. Realmente, son Kubota y Ohzu los que proponen originariamente la idea de utilizar un patrón *speckle* (Kubota y Ohzu, 1957). Para controlar el contenido de frecuencias espaciales del patrón *speckle* que se forma sobre el detector CCD, Boreman y Dereniak utilizan como abertura una rendija simple (Boreman y Dereniak, 1986). La MTF del detector puede obtenerse a partir de la PSD de entrada (que es conocida teóricamente para la abertura) y la PSD de salida obtenida experimentalmente a partir de la distribución de irradiancia del patrón *speckle* que se forma sobre el plano de píxeles del CCD. La PSD es proporcional a la autocorrelación de la función de transmisión de la abertura más una función delta de Dirac a frecuencia espacial cero (Goldfischer, 1965) (Goodman, 1984).

Posteriormente, Boreman demuestra experimentalmente la viabilidad de usar como difusor una esfera integradora para generar el patrón *speckle* (Boreman *et al.*, 1990). Con el objetivo de extender el rango de frecuencias espaciales en la medida de la MTF de detectores CCD, Sensiper utiliza como abertura una rendija doble, que permite medir la MTF del detector hasta casi el doble de su frecuencia de Nyquist (Sensiper *et al.*, 1993). Pozo y Rubiño comparan la MTF de un detector CCD obtenida con ambos tipos de aberturas (rendija simple y doble), y analizan las ventajas e inconvenientes de utilizar una u otra (Pozo y Rubiño, 2004) (Pozo y Rubiño, 2005a). Ducharme utiliza como difusor una matriz de microlentes, demostrando experimentalmente la viabilidad de este tipo de difusor para medir la MTF de detectores CCD mediante el método *speckle* (Ducharme, 2007). La MTF de detectores CCD también se ha evaluado utilizando un patrón fabricado mediante técnicas holográficas (Ducharme y Boreman, 1995); este método permite obtener una mayor irradiancia sobre el detector en comparación con el método propuesto por Sensiper (Sensiper *et al.*, 1993).



Finalmente, los patrones aleatorios se han utilizado también en la caracterización óptica de sistemas optoelectrónicos compuestos por un detector y un sistema óptico. Estos patrones se pueden generar de diferentes maneras: impresos en transparencias iluminadas por transmisión (Daniels *et al.*, 1995) (Backman *et al.*, 2004); impresos en papel y utilizando iluminación por reflexión (Pospíšil *et al.*, 2005); presentados en el monitor de un ordenador (Levy *et al.*, 1999) (Pozo *et al.*, 2007) (Pozo *et al.*, 2008); o utilizando un proyector (Teipen y MacFarlane, 2000). Es claro que, en todos estos métodos, la MTF resultante es la correspondiente al sistema total (CCD más sistema óptico).

## 4. JUSTIFICACIÓN

Un sistema optoelectrónico formador de imágenes está constituido por varios subsistemas. Así, por ejemplo, podemos tener un sistema constituido por un detector CCD, una lente-objetivo y una tarjeta capturadora de imágenes. Por una parte podríamos decir, y sin temor a equivocarnos, que es el detector el “corazón” del sistema optoelectrónico, ya que transforma la irradiancia sobre su superficie sensible (causada por la radiación electromagnética proveniente de la escena de interés) en una señal eléctrica mensurable. En los últimos años, el gran desarrollo de la tecnología de semiconductores ha permitido la generalización del uso de los dispositivos de captura de imágenes basados en matrices de detectores semiconductores tanto en el ámbito doméstico como en los ámbitos técnico y científico. Parte importante del enorme interés por los detectores CCD se debe a su alta resolución, alta eficiencia cuántica, amplia respuesta espectral, bajo ruido, linealidad, fidelidad geométrica, rápida respuesta, pequeño tamaño, bajo consumo y alta duración. Así, por ejemplo, los detectores CCD se han incorporado en los sistemas de medida radiométricos y fotométricos utilizados en astrofísica, iluminación, o visión artificial, además de utilizarse en metrología, control de calidad, o monitorización de entornos, entre otras aplicaciones. Es, por tanto, de gran importancia, disponer de dispositivos experimentales y procedimientos que permitan evaluar, con baja incertidumbre, la calidad óptica del detector independientemente del sistema óptico que forme parte del sistema optoelectrónico en cuestión. Sin embargo, cada método puede presentar ventajas e inconvenientes respecto a los demás, siendo necesario determinar experimentalmente cuál es el que permite una mejor evaluación de la calidad óptica del detector.

La MTF es uno de los parámetros más importantes en la evaluación de la calidad óptica de un sistema optoelectrónico, y caracteriza la respuesta en frecuencia espacial del mismo. En cambio, y por simplicidad, cuando se pretende caracterizar el detector, la mayoría de las veces se hace uso de sistemas ópticos, conduciendo a una caracterización no rigurosa y poco fiable del detector. En efecto, estos métodos mezclan las cualidades del detector con las características

del sistema óptico. De este modo solamente se puede evaluar, en rigor, la calidad óptica del sistema total, pero no la calidad óptica del detector de manera aislada. En definitiva, no es posible determinar de esta manera cómo influye el detector en la degradación final de la imagen proporcionada por el sistema optoelectrónico.

Tras una revisión bibliográfica de los diferentes métodos de caracterización óptica de detectores, se optó por el método *speckle*, dadas las numerosas ventajas que presentaba sobre otros métodos de medida de MTF de detectores. Entre ellas, podemos destacar las siguientes:

- No es necesario un sistema óptico para formar la imagen sobre la matriz de píxeles del detector y, por tanto, es posible caracterizar el detector independientemente del sistema óptico.

- No requiere una técnica mecánica de “barrido” y, en consecuencia, no se necesitan componentes electromecánicos adicionales.

- Permite caracterizar toda la matriz de píxeles del detector.

- El montaje experimental es relativamente simple, a diferencia de, por ejemplo, los métodos interferométricos.

- Al tratarse de un patrón de irradiancia de granulado aleatorio, la alineación del sistema no es especialmente crítica.

La presente memoria aborda, pues, la caracterización óptica de detectores CCD mediante patrones *speckle*. Tomando como punto de partida los trabajos de Boreman y Sensiper (Boreman y Dereniak, 1986) (Sensiper *et al.*, 1993), se han comparado ambos métodos; se ha mejorado el método de Boreman (Boreman y Dereniak, 1986) proponiendo dos correcciones que permiten evaluar la MTF de detectores CCD con baja incertidumbre; finalmente, se han desarrollado dos aplicaciones, basadas en patrones *speckle*, que permiten caracterizar lentes oftálmicas y videocámaras CCD.

## 5. OBJETIVOS

1. Comparar dos métodos de medida de la MTF de detectores CCD basados en el fenómeno *speckle*, utilizando como aberturas una rendija simple y una rendija doble.
2. Analizar factores experimentales que afectan a la evaluación de la PSD, a partir de la cual se obtiene la MTF del CCD mediante el método *speckle* con rendija simple.
3. Proponer y validar experimentalmente mejoras al método *speckle* con rendija simple, que permitan evaluar la MTF de detectores CCD con baja incertidumbre.
4. Caracterizar, en términos de la MTF, lentes oftálmicas mediante el método *speckle* con rendija doble.
5. Analizar la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de una videocámara CCD mediante el método *speckle* con rendija simple.

A continuación se comenzará en el capítulo 6 con una breve descripción del dispositivo experimental. En el capítulo 7 se discuten los resultados experimentales correspondientes a los artículos presentados en la tabla 1, y que se adjuntan en el Anexo I y Anexo II de la presente memoria.

Tabla 1: *Cuadro esquemático de los objetivos planteados y artículos.*

<b>Objetivos</b>	<b>Artículo</b>
1. Comparar dos métodos de medida de la MTF de detectores CCD basados en el fenómeno <i>speckle</i> , utilizando como aberturas una rendija simple y una rendija doble.	Pozo A. M., Rubiño M., “Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer function of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle”, <i>Appl. Opt.</i> 44(9), 1543-1547 (2005).
2. Analizar factores experimentales que afectan a la evaluación de la PSD, a partir de la cual se obtiene la MTF del CCD mediante el método <i>speckle</i> con rendija simple.  3. Proponer y validar experimentalmente mejoras al método <i>speckle</i> con rendija simple, que permitan evaluar la MTF de detectores CCD con baja incertidumbre.	Pozo A. M., Ferrero A., Rubiño M., Campos J., Pons A., “Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method”, <i>Opt. Express</i> 14(13), 5928-5936 (2006).
4. Caracterizar, en términos de la MTF, lentes oftálmicas mediante el método <i>speckle</i> con rendija doble.	Pozo A. M., Rubiño M., “Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern”, <i>Appl. Opt.</i> 44(36), 7744-7748 (2005).
5. Analizar la influencia de la tarjeta capturadora de imágenes en la MTF de una videocámara CCD mediante el método <i>speckle</i> con rendija simple.	Pozo A. M., Fernández-Oliveras A., Rubiño M., “Influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método <i>speckle</i> ”, (en proceso de realización).

## 6. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En la figura 6.1 se muestra el dispositivo experimental utilizado para llevar a cabo el análisis comparativo de la MTF de un detector CCD utilizando dos aberturas diferentes (primer artículo del Anexo I). Está compuesto por un láser de He-Ne, una esfera integradora, una abertura (rendija simple o doble), un polarizador lineal y, finalmente, el detector CCD conectado a su tarjeta digitalizadora instalada en un ordenador personal.

El dispositivo experimental mostrado en la figura 6.1 presenta modificaciones cuando se aplica a la caracterización óptica de lentes oftálmicas o al análisis de la influencia de la tarjeta de vídeo en la MTF de una videocámara CCD. En el caso del artículo sobre las mejoras para determinar la MTF de detectores CCD mediante el método *speckle*, el dispositivo experimental es diferente al mostrado en la figura 6.1. En cualquier caso, los detalles concretos sobre los dispositivos y procedimientos experimentales pueden consultarse en los artículos correspondientes de los anexos I y II.

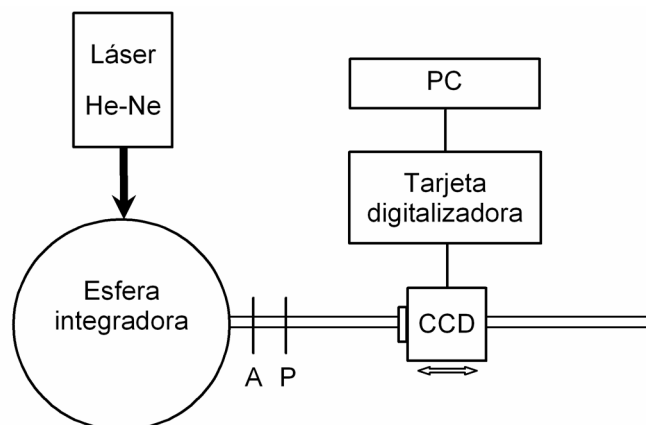


Figura 6.1: *Dispositivo experimental para la medida de la MTF del detector CCD. En la abertura de salida de la esfera integradora se sitúa una abertura, A (rendija simple o doble) y un polarizador, P.*

En la figura 6.2 se muestra una fotografía del dispositivo experimental correspondiente al esquema mostrado en la figura 6.1. Se puede apreciar el láser

## 6. Dispositivo experimental

---

He-Ne incidiendo en la abertura de entrada de la esfera integradora. A continuación de la abertura de salida de la esfera se encuentra una rendija simple con una lámina polarizadora adherida a la misma y, finalmente, la cámara CCD con su correspondiente tarjeta digitalizadora instalada en un ordenador. Al fondo puede verse en el monitor del ordenador el patrón *speckle* registrado con el detector CCD. Finalmente, en la figura 6.3 se muestra una fotografía del patrón *speckle* en la abertura de entrada de la esfera integradora.

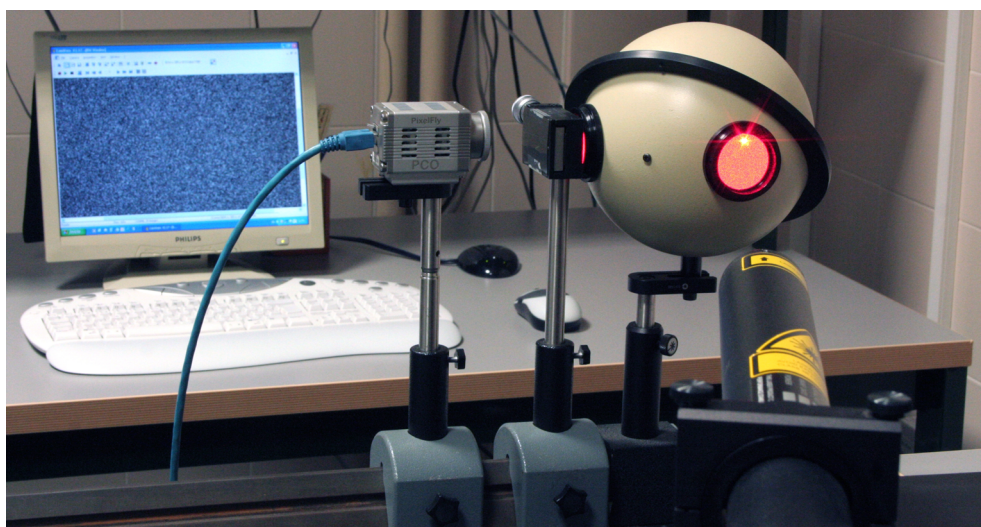


Figura 6.2: *Dispositivo experimental para la medida de la MTF del detector CCD: láser He-Ne, esfera integradora, abertura, lámina polarizadora y cámara CCD.*

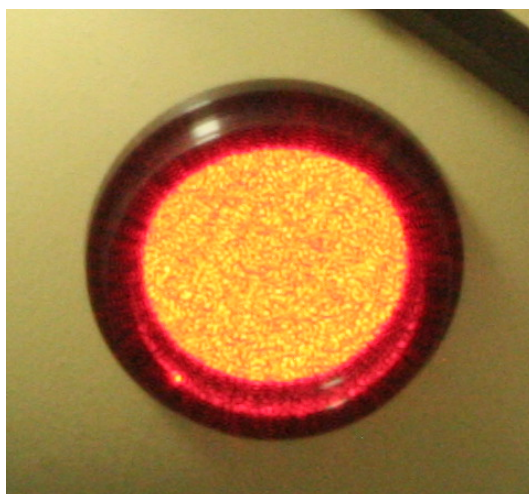


Figura 6.3: *Detalle del patrón speckle formado en la abertura de entrada de la esfera integradora.*

## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 7.1. De la comparación de dos métodos de medida de la MTF de detectores CCD basados en la generación de patrones de moteado láser (*speckle*)

En las figuras 7.1 y 7.2 se muestra una sección del patrón *speckle* capturado con el detector CCD y sus correspondientes PSD, utilizando como aberturas una rendija simple y una rendija doble, respectivamente (Pozo y Rubiño, 2005a).

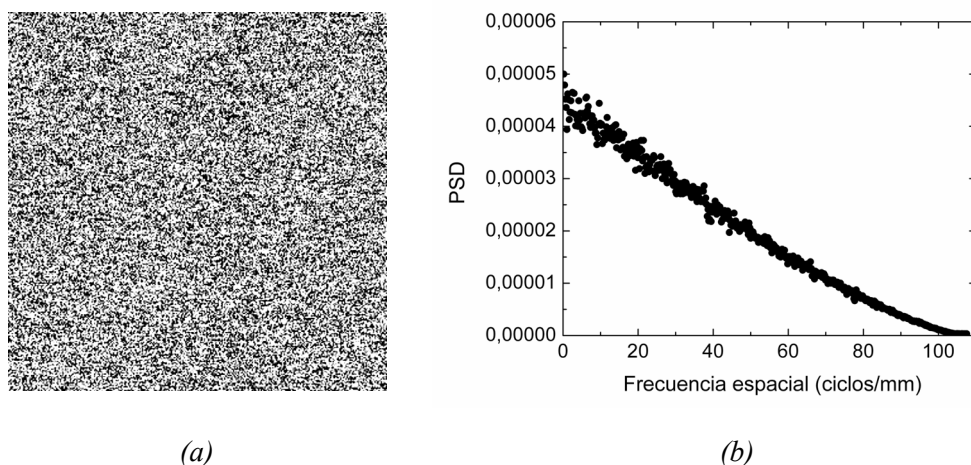


Figura 7.1: (a) Patrón *speckle* obtenido con la rendija simple y (b) su correspondiente  $PSD_{salida}(\xi)$ .

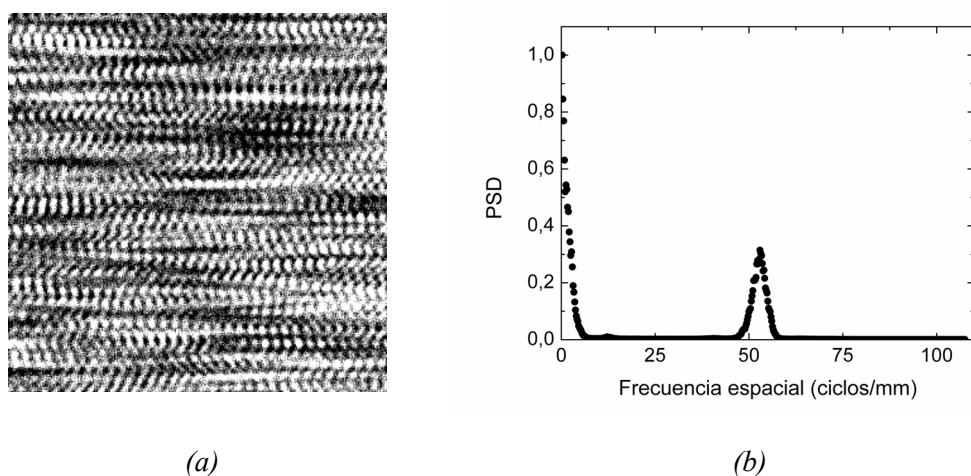


Figura 7.2: (a) Patrón *speckle* obtenido con la rendija doble y (b) su correspondiente  $PSD_{salida}(\xi)$ .



Cuando se utiliza como abertura una rendija simple, basta establecer la distancia apropiada entre el CCD y la rendija para evaluar la MTF del detector, de manera que se puede caracterizar el CCD para una posición dada del mismo. En cambio, cuando se utiliza como abertura una rendija doble se obtiene un máximo relativo en la PSD, centrado en una frecuencia espacial que depende de la distancia entre el CCD y la rendija. La distancia entre el CCD y la rendija determina, por tanto, la frecuencia espacial que está siendo evaluada en cada momento, de modo que las frecuencias espaciales altas se consiguen cuando el CCD está próximo a la rendija, mientras que las frecuencias espaciales bajas se obtienen cuando el CCD está lejos de la rendija. Variando, pues, la distancia entre el CCD y la rendija, se puede evaluar la MTF para diferentes frecuencias espaciales. De aquí se desprende que el método *speckle* con rendija doble es un método de medida que conlleva un tiempo de ejecución mayor que cuando se utiliza como abertura una rendija simple.

En el caso de la rendija simple, la MTF se obtuvo a partir de un ajuste de la  $PSD_{salida}(\xi)$  a un polinomio de orden 6, con un coeficiente de correlación de 0,994. Este polinomio es el que mejor ajustaba los datos experimentales en todo el rango de frecuencias espaciales; polinomios de orden más bajo ajustaban bien los datos correspondientes a frecuencias bajas y medias, pero no a frecuencias altas.

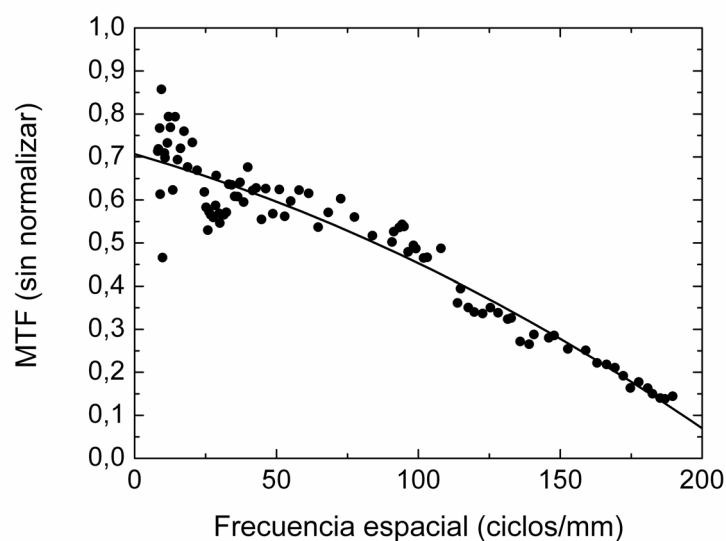


Figura 7.3:  $MTF(\xi)$  del CCD obtenida con la rendija doble. Con trazo continuo se representa la curva que ajusta los datos experimentales.

En el caso de la doble rendija, los valores experimentales de la MTF se ajustaron a un polinomio de orden 2, con un coeficiente de correlación de 0,908 (ver figura 7.3).

En la figura 7.4 se comparan las curvas de ajuste de la MTF normalizada del CCD obtenida con la rendija simple y la rendija doble. Como puede observarse, con los dos métodos analizados se obtienen valores diferentes para la MTF del detector CCD. Con el método de la rendija simple, sólo es posible medir la MTF para frecuencias espaciales inferiores a la frecuencia de Nyquist del detector (107,53 ciclos/mm), obteniéndose valores de MTF superiores a los obtenidos con el método de la rendija doble (excepto en el entorno de la frecuencia de Nyquist). En cambio, con el método de la rendija doble, es posible medir la MTF del detector en un rango de frecuencias espaciales hasta aproximadamente 1.8 veces la frecuencia de Nyquist, lo que permite obtener una caracterización más completa del detector, aunque tiene el inconveniente de ser un método de medida más lento por la necesidad de desplazar el CCD.

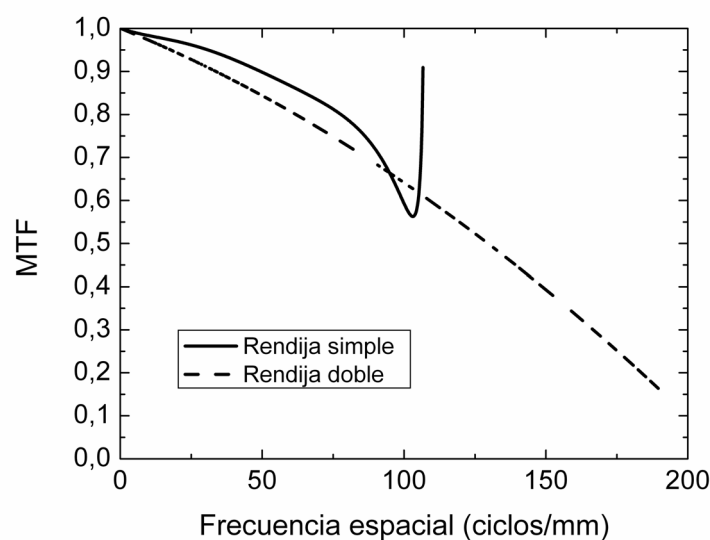


Figura 7.4:  $MTF(\xi)$  del CCD obtenida con dos aberturas distintas mediante el método speckle. Con trazo continuo se representa la MTF cuando se utiliza la rendija simple, y con trazo punteado en el caso de la rendija doble.

Es interesante notar, en el caso de rendija simple, el aumento de los valores de la MTF que se aprecia en torno a la frecuencia de Nyquist. Esto es

debido a que en dicha zona, la  $PSD_{entrada}$  se aproxima a cero, mientras que la  $PSD_{salida}$  tiene aún un valor finito debido al propio ruido del CCD. Obviando este tramo creciente de la MTF (considerando solamente las frecuencias hasta 102,70 ciclos/mm), la diferencia entre los valores de MTF entre las dos curvas fue siempre menor que 0,1 en valor absoluto, y la desviación cuadrática media (*root mean square*, rms) entre ambas curvas fue 0,046 (4,6%).

## 7.2. De las mejoras propuestas para evaluar la MTF de detectores CCD mediante el método *speckle* con rendija simple

En las figuras 7.5(a) y 7.5(b) se muestra la  $PSD_{salida}$  obtenida a partir del patrón *speckle* sin la corrección de no-uniformidad de respuesta y con dicha corrección, frente a la frecuencia espacial normalizada a la frecuencia Nyquist.

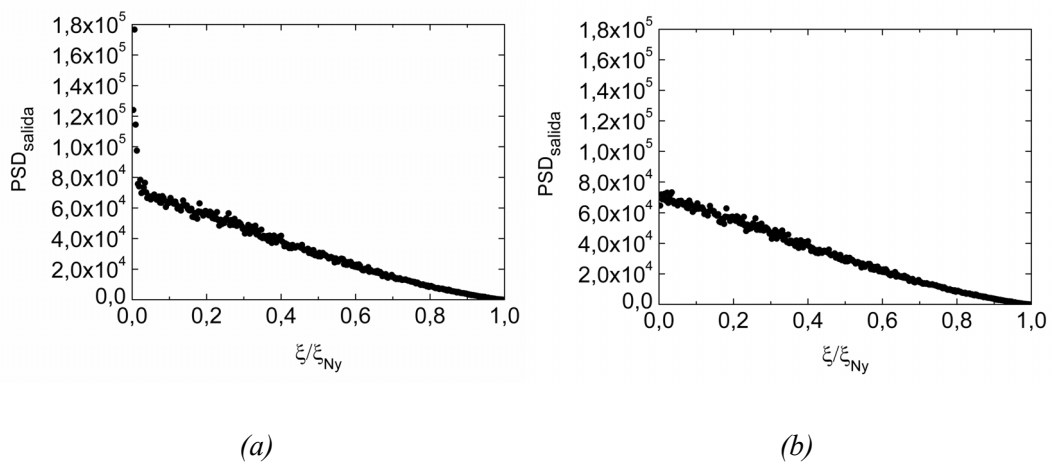


Figura 7.5:  $PSD$  determinadas para una distancia de 30,8 mm entre la ventana del CCD y la rendija simple (a) sin la corrección de la no-uniformidad de respuesta y (b) con la corrección. En el eje de abscisas se representa la frecuencia espacial normalizada al valor de la frecuencia de Nyquist del CCD (50,5 ciclos/mm).

Es interesante notar los altos valores obtenidos a bajas frecuencias espaciales en la  $PSD_{salida}$  que impiden un ajuste de los valores experimentales a un

polinomio de orden bajo. Estos valores altos se encuentran por debajo de la frecuencia normalizada de 0,0125 que es equivalente a 0,63 ciclos/mm.

Si se comparan las figuras 7.5(a) y 7.5(b) se puede apreciar cómo los valores del espectro a bajas frecuencias espaciales son atenuados cuando se aplica la corrección de no-uniformidad de respuesta que hemos propuesto (Pozo *et al.*, 2006).

Para investigar la influencia en la  $PSD_{salida}$  debida a la variación de la distancia entre el CCD y la rendija, obtuvimos la  $PSD_{salida}$  a 3 distancias diferentes entre la ventana del CCD y la rendija. La primera distancia elegida entre la ventana y la apertura fue 31,8 mm. La figura 7.6 proporciona una representación del doble espectro de la  $PSD_{salida}$ , mostrando el fenómeno de *aliasing*. Para esta distancia la frecuencia de Nyquist aún no se ha alcanzado ya que no se ha producido el solapamiento entre las dos ramas del espectro; por tanto, la frecuencia de corte de la  $PSD_{salida}$  es menor que la frecuencia de Nyquist del CCD.

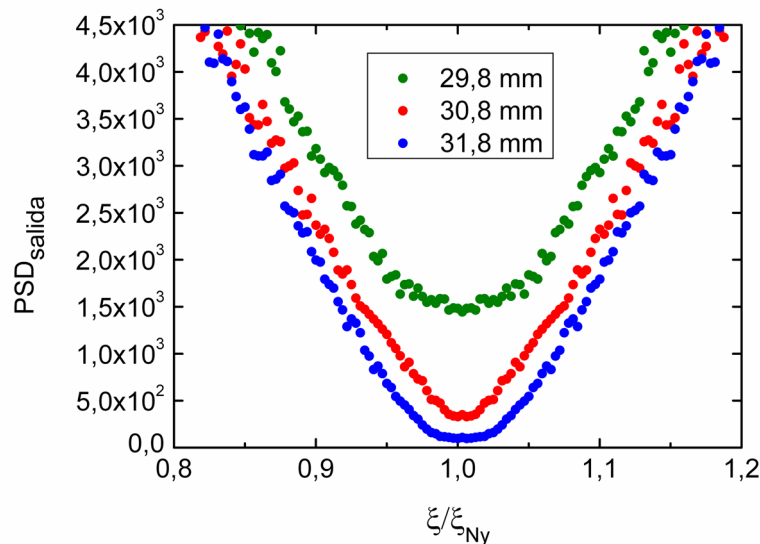


Figura 7.6: Detalle de las PSD encontradas a tres distancias diferentes entre la ventana del CCD y la rendija simple. En el eje de abscisas se representa la frecuencia espacial normalizada a la frecuencia de Nyquist del CCD.

Sería necesario, pues, reducir la distancia entre el CCD y la rendija. Por ello, se realizaron dos medidas más a 30,8 y 29,8 mm. Al disminuir la distancia entre el

CCD y la rendija, el mínimo de la  $PSD_{salida}$  comienza a aumentar debido al solapamiento de las dos ramas del espectro. La corrección propuesta (Pozo *et al.*, 2006), consiste en substraer este valor mínimo (correspondiente a la frecuencia de Nyquist) a la curva ajustada de la  $PSD_{salida}$ , que puede ser considerado como un valor de base. Esta substracción debe hacerse cuando comienza el solapamiento de las dos ramas.

Una vez que el patrón *speckle* se ha corregido de la no-uniformidad de respuesta, se puede obtener la MTF a partir de la  $PSD_{salida}$  siguiendo el procedimiento descrito en (Boreman y Dereniak, 1986) (Boreman *et al.*, 1990). Las PSD correspondientes a 29,8 , 30,8 y 31,8 mm se ajustaron a polinomios de orden 3 con coeficientes de correlación de 0,995, 0,996, y 0,995, respectivamente. Una vez obtenidas las curvas de ajuste de las PSD, se calcularon las MTF mostradas en la figura 7.7. Dicha figura muestra que se obtienen diferentes curvas para las diferentes posiciones del CCD. Para cuantificar la desviación entre las curvas, calculamos el rms. El rms entre la MTF a 29,8 mm y la MTF a 30,8 mm fue 10,6%, entre la MTF a 29,8 mm y la MTF a 31,8 mm fue 16,0% y el rms entre la MTF a 30,8 mm y la MTF a 31,8 mm fue 5.6%.

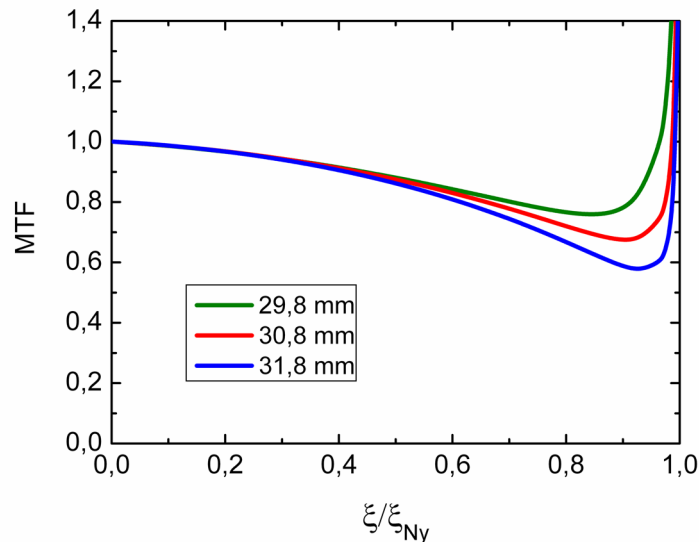


Figura 7.7: MTF del CCD obtenidas a partir de las PSD de la figura 7.6. En el eje de abscisas se representa la frecuencia espacial normalizada a la frecuencia de Nyquist del CCD.

Como se mencionó anteriormente, la corrección que hemos propuesto consiste en sustraer el valor de base (correspondiente a la frecuencia de Nyquist) en las PSD ajustadas una vez que comienza el solapamiento en el doble espectro de la  $PSD_{salida}$ . La figura 7.8 muestra las MTF calculadas después de aplicar la corrección para las distancias de 29,8 mm y 30,8 mm, y la MTF para 31,8 mm sin corregir. Podemos ver cómo ambas MTF son mucho más próximas que antes de aplicar la corrección. El rms entre las MTF corregidas es tan sólo de 0,43%, mientras que sin corrección era 10,6%. A raíz de estos resultados se puede concluir que la corrección propuesta minimiza la influencia del error cometido al establecer experimentalmente la distancia entre el CCD y la abertura. Además, esta corrección presenta la ventaja de que elimina la parte creciente de la MTF próxima a la frecuencia de Nyquist (comparar figuras 7.7 y 7.8) y por tanto permite la caracterización del CCD hasta la frecuencia de Nyquist.

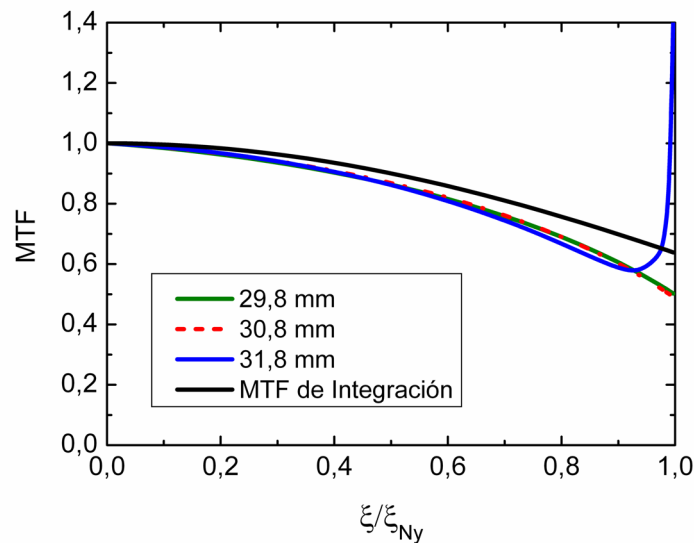


Figura 7.8: MTF para las distancias de 29,8 mm y 30,8 mm entre la ventana del CCD y la abertura, determinadas después de aplicar la corrección del valor de base (baseline value). También se representa la MTF (sin corrección) para una distancia de 31,8 mm entre la ventana del CCD y la abertura. La MTF de integración constituye el límite teórico de la MTF del CCD. En el eje de abscisas se representa la frecuencia espacial normalizada a la frecuencia de Nyquist del CCD.

La figura 7.8 muestra, además, la MTF de integración ( $MTF_I$ ). Todas las MTF determinadas experimentalmente se encontraron por debajo de la  $MTF_I$ ,

como ha de ocurrir, ya que la  $MTF_I$  constituye el límite teórico para la MTF de un detector. Las diferencias encontradas entre las MTF experimentales y la  $MTF_I$  son debidas a las componentes de difusión ( $MTF_D$ ) y la MTF de eficiencia de transferencia de carga ( $MTF_{CTE}$ ). Es de esperar que la  $MTF_D$  tenga una influencia importante en este CCD, ya que los píxeles son pequeños y la carga puede difundirse a píxeles vecinos. Asimismo, es de esperar una influencia importante de la  $MTF_{CTE}$  ya que el CCD posee un gran número de píxeles y hay involucradas numerosas transferencias de carga.

### 7.3. De la caracterización óptica de lentes oftálmicas mediante la MTF a partir de patrones *speckle*

La figura 7.9 muestra una sección del patrón *speckle* capturado con el CCD y su  $PSD_{salida}$ , obtenidos con la lente de +3D del fabricante M1 (Pozo y Rubiño, 2005b).

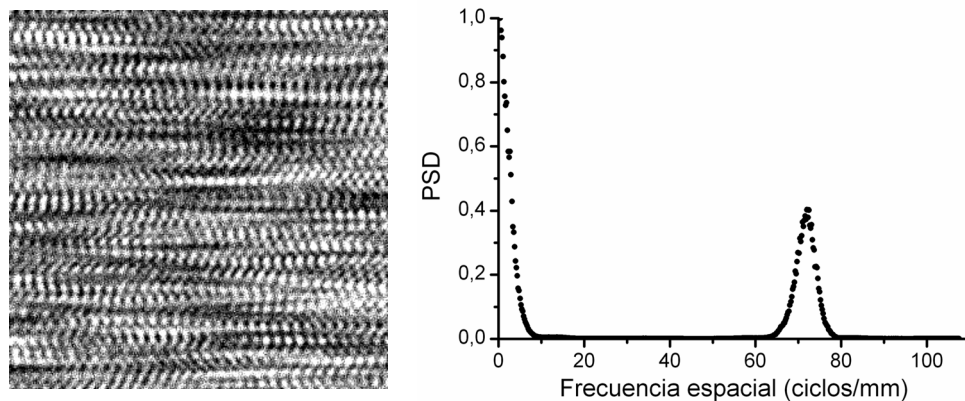


Figura 7.9: (a) Patrón *speckle* obtenido con la rendija doble y la lente de +3D del fabricante M1 y (b) su correspondiente  $PSD_{salida}$ .

La figura 7.10 muestra la MTF del sistema total (lente más CCD) para las lentes del fabricante M2. Los valores experimentales de MTF se ajustaron a un polinomio de segundo orden, con coeficientes de correlación de 0,89, 0,81, 0,88, 0,93 y 0,91 para las lentes de 0D (lente de potencia cero), -5D, -3D, +3D y +5D, respectivamente. La figura 7.10 muestra que las lentes de potencia negativa

presentaron valores mayores de MTF que las de potencia positiva. Por otra parte, en el caso de las lentes negativas, la lente de -5D proporcionó valores más altos que la lente de -3D. Para las lentes positivas, los valores de MTF para la lente de +5D fueron superiores a los de la lente de +3D.

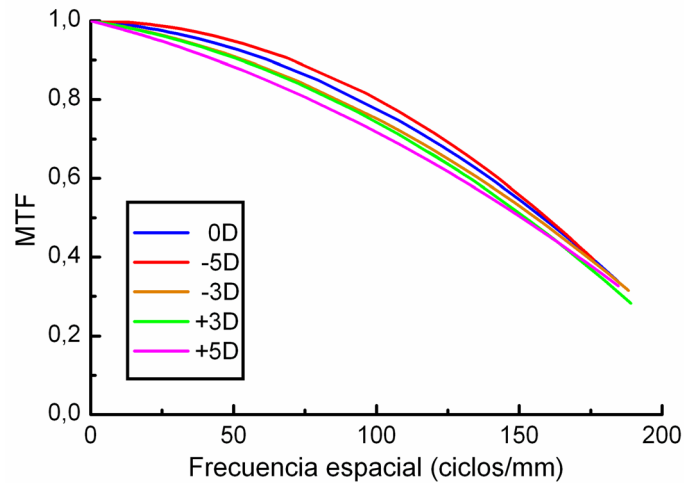


Figura 7.10: MTF del sistema total para las lentes del fabricante M2.

En las figuras 7.11 y 7.12 se muestra una comparación entre las lentes de +3D y -3D para los dos fabricantes (M1 y M2). Se representa, además, la incertidumbre asociada a los valores correspondientes al fabricante M1, calculada como una desviación estándar a partir de 20 medidas para cada posición del CCD.

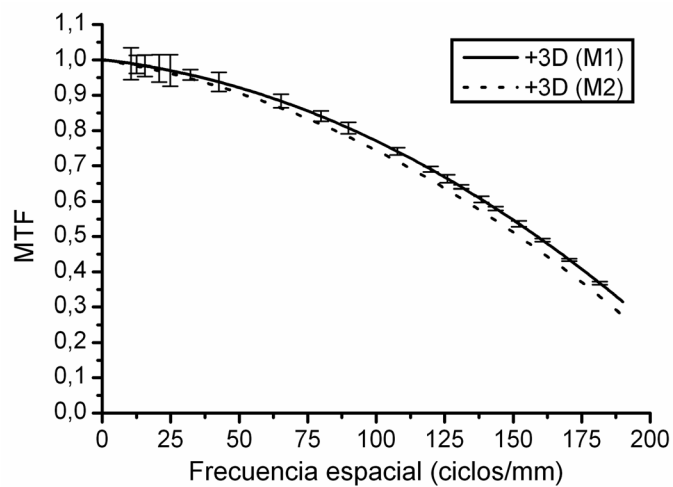


Figura 7.11: Comparación entre la MTF obtenida con las lentes de +3D de los dos fabricantes. Se muestra la incertidumbre en el caso de la lente del fabricante M1.



En el caso de las lentes del fabricante M1 se obtuvieron valores mayores de MTF que en el caso del fabricante M2, indicando una mayor calidad óptica en términos de MTF. El ajuste de los datos experimentales a polinomios de segundo orden para las lentes de -3D y +3D del fabricante M1 fue 0,92 y 0,90, respectivamente. Es interesante notar que la incertidumbre es mayor para las frecuencias espaciales bajas. Esto podría ser debido a la baja señal que llega al CCD, ya que las frecuencias espaciales bajas son testadas lejos de la lente y, por tanto, lejos de la fuente láser.

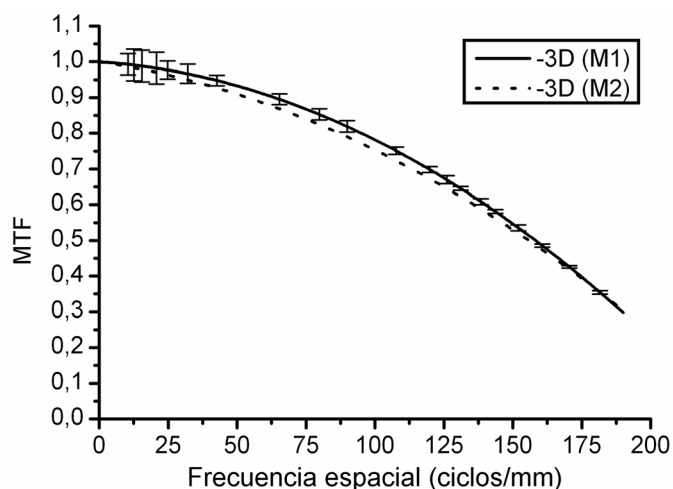


Figura 7.12: *Comparación entre la MTF obtenida con las lentes de -3D de los dos fabricantes. Se muestra la incertidumbre en el caso de la lente del fabricante M1.*

En la figura 7.13 se representa, en el eje de ordenadas, el cociente entre las curvas de MTF para las lentes de +3D y -3D de los fabricantes M1 y M2. Este tipo de representación ofrece una ventaja importante: al hacer el cociente entre las dos curvas, se cancela el efecto de la modulación en frecuencia espacial que introduce el CCD. Para la lente de +3D, la MTF de la lente del fabricante M1 es mayor que la del fabricante M2. Para la lente de -3D, la MTF en el caso del fabricante M1 es mayor que la del fabricante M2, pero al contrario que la lente de +3D, comienza después a disminuir a partir de la frecuencia de Nyquist (107,5 ciclos/mm).

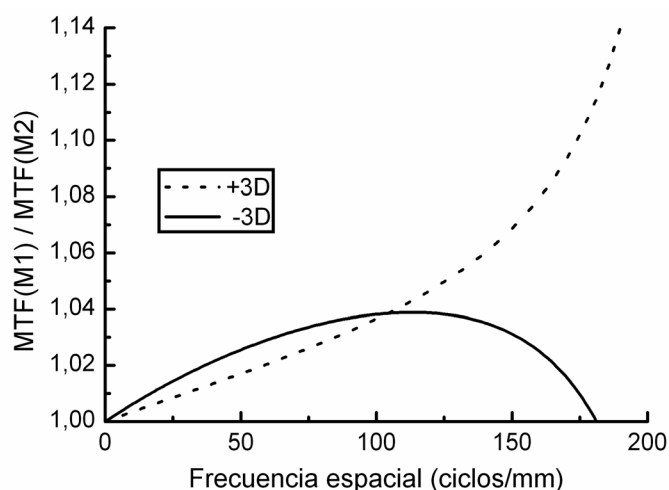


Figura 7.13: Cociente de las curvas MTF para las lentes de +3D y -3D de los fabricantes M1 y M2.

#### 7.4. De la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método *speckle*

En la figura 7.14 se muestra la MTF horizontal de la videocámara utilizando las dos tarjetas.

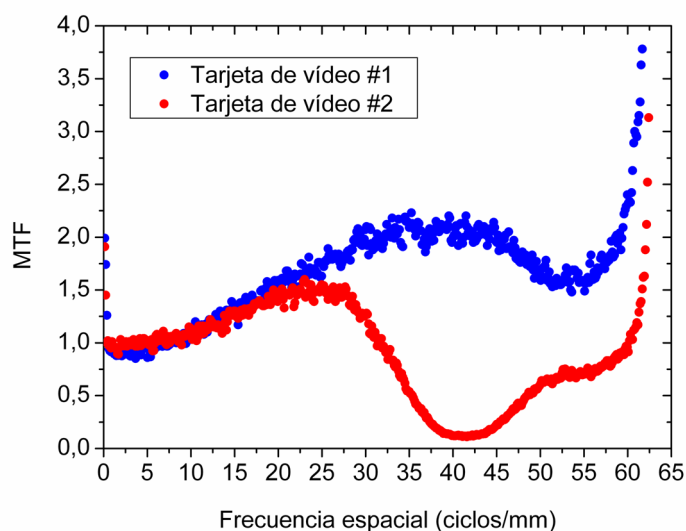


Figura 7.14: MTF de la videocámara CCD utilizando dos tarjetas capturadoras de vídeo diferentes: tarjeta #1 (MovieBox DV) y tarjeta #2 (VCE-B5A01).

Se puede observar en la figura 7.14 que con la tarjeta #1 se obtienen valores superiores de MTF, indicando una mayor calidad óptica del conjunto constituido por la tarjeta de vídeo #1 y la videocámara. En el rango de frecuencias espaciales bajas (hasta 20 ciclos/mm), el comportamiento de ambas tarjetas es similar. A partir de dicha frecuencia espacial, se obtienen mayores valores de MTF con la tarjeta #1. Además, la tarjeta #2 presenta una respuesta prácticamente nula en el entorno de 40 ciclos/mm. Este hecho es importante, pues si se utilizara la tarjeta #2 para una aplicación concreta, el sistema no permitiría resolver detalles de una escena con frecuencias espaciales en el entorno de 40 ciclos/mm.

Otro aspecto interesante que se aprecia en la figura 7.14 es que la frecuencia *boost* es diferente para ambas tarjetas: 37 ciclos/mm y 25 ciclos/mm para las tarjetas #1 y #2, respectivamente. Se pueden observar también los elevados valores de MTF obtenidos a bajas frecuencias espaciales, debidos a la no-uniformidad del campo producido por la rendija simple y a la no-uniformidad de respuesta espacial del detector (Pozo *et al.*, 2006). Los valores elevados en ambas curvas a partir de 55 ciclos/mm son debidos a que en el entorno de la frecuencia de Nyquist, la  $PSD_{entrada}$  se aproxima a cero, mientras que la  $PSD_{salida}$  tiene aún un valor finito debido al propio ruido del CCD (Pozo y Rubiño, 2005a).

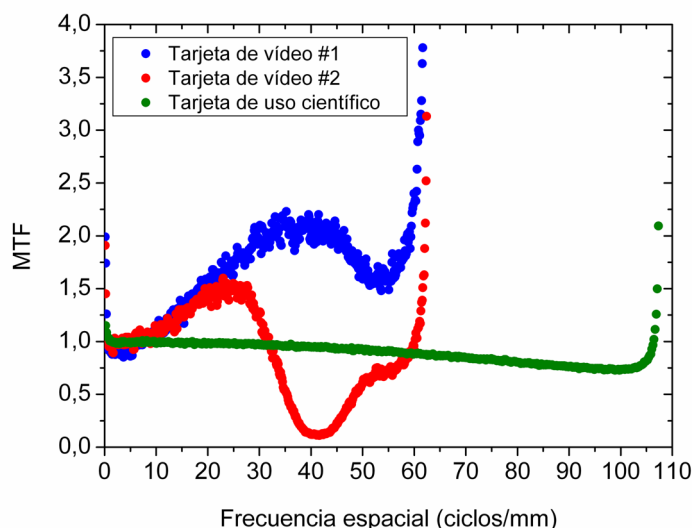


Figura 7.15: *Comparación entre las MTF de la videocámara con las tarjetas captadoras #1 y #2 y la MTF de una cámara CCD de uso científico con su correspondiente tarjeta digitalizadora.*

En la figura 7.15 se compara la MTF de la videocámara con la MTF obtenida para una cámara de uso científico (Pozo y Rubiño, 2005a) con su correspondiente tarjeta digitalizadora. Como se puede observar en el caso de la cámara de uso científico, el rango de frecuencias espaciales es mayor y no presenta *boost*.



## 8. CONCLUSIONES

1. Se ha llevado a cabo el montaje y la puesta a punto de un dispositivo experimental, para la medida de la MTF de detectores CCD mediante el método *speckle*, basado en una fuente láser y una esfera integradora.

2. Se han analizado y comparado dos métodos de medida de la MTF de detectores CCD, basados en la generación de patrones *speckle* mediante una esfera integradora, utilizando como aberturas una rendija simple y una rendija doble. Este análisis ha permitido mostrar las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos: cuando se utiliza una rendija simple, solamente se puede medir la MTF hasta una frecuencia próxima a la frecuencia de Nyquist del detector. En cambio, si se utiliza una rendija doble, la caracterización del CCD es más completa, ya que permite evaluar la MTF hasta el doble de la frecuencia de Nyquist; en este caso, el proceso de medida requiere mayor tiempo de ejecución.

3. Se han analizado factores experimentales que afectan a la PSD, a partir de la cual se obtiene la MTF del detector CCD mediante el método *speckle* con rendija simple. Dichos factores influyen significativamente en la MTF en dos regiones concretas: la región de frecuencias espaciales bajas y la región de frecuencias espaciales altas. Este análisis ha permitido proponer y validar experimentalmente dos correcciones, una para la región de frecuencias bajas y otra para la región de frecuencias altas.

4. En relación con el análisis de factores experimentales que afectan a la PSD, se ha demostrado experimentalmente que la no-uniformidad del campo producido por la rendija simple y la no-uniformidad de fotorrespuesta del CCD, originan valores elevados de la PSD en la región de frecuencias espaciales bajas. Se ha propuesto y validado una corrección que permite atenuar dichos valores elevados.

5. Con respecto al análisis de factores experimentales que afectan a la PSD, se ha demostrado que el error cometido al establecer experimentalmente la

distancia entre la rendija simple y el detector es crítico en el método *speckle*, e influye significativamente en la MTF en la región de frecuencias espaciales altas. Una variación de 1 mm en la distancia entre el CCD y la rendija origina una desviación cuadrática media entre las MTF del 10,6%. Se ha propuesto y validado una corrección que permite minimizar la influencia de dicho error en la MTF, reduciendo la desviación cuadrática media hasta el 0,43%.

6. En vista de las conclusiones 3, 4 y 5, se recomienda tener en cuenta las dos correcciones propuestas para obtener la MTF, con baja incertidumbre, de detectores CCD mediante el método *speckle* con rendija simple.

7. Se ha propuesto y validado experimentalmente un método basado en la generación de patrones *speckle*, utilizando como abertura una rendija doble, que permite caracterizar lentes oftálmicas convergentes y divergentes, en términos de la MTF.

8. Se ha demostrado experimentalmente la viabilidad del método *speckle* con rendija simple, para analizar la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de una videocámara CCD. Además, el método permite comparar la calidad de diferentes tarjetas capturadoras, así como obtener la frecuencia *boost* de las mismas.

9. El dispositivo experimental y procedimiento presentados en esta memoria, permitirían evaluar con baja incertidumbre, la calidad óptica de detectores de muy diversos sistemas optoelectrónicos, como cámaras y videocámaras digitales, cámaras web, cámaras de teléfonos móviles, sistemas de videovigilancia, cámaras utilizadas en robótica y visión artificial, o instrumentos optométricos y oftalmológicos, entre otros.

## 9. PERSPECTIVAS

No se puede dejar de mencionar, en la presente memoria, la creciente y continua incorporación de los detectores CMOS en numerosos sistemas optoelectrónicos, como sistemas de videovigilancia, cámaras fotográficas y videocámaras digitales de uso doméstico, cámaras de teléfonos móviles, cámaras web, o sistemas de visión industriales. Esto es debido a que los detectores CMOS poseen interesantes características (que son a su vez las desventajas que presentan los detectores CCD), como son su menor coste, bajo consumo de potencia eléctrica, alta velocidad de operación, o su mayor capacidad de integración que permite la fabricación de cámaras de pequeño tamaño. A pesar de ello, la tecnología CCD sigue prevaleciendo actualmente en aplicaciones que requieran una alta calidad de imagen, como por ejemplo en el ámbito científico. El dispositivo experimental y procedimiento presentados en esta memoria para la caracterización de detectores CCD, permitirían evaluar la MTF de detectores CMOS y se podrían realizar comparaciones efectivas de calidad óptica entre ambos tipos de detectores. En definitiva, y de manera general, se podría evaluar la calidad óptica de detectores (constituidos por matrices de elementos fotosensibles lineales o de área) de muy diversos sistemas optoelectrónicos, como cámaras y videocámaras digitales, cámaras web, cámaras de teléfonos móviles, sistemas de videovigilancia, cámaras utilizadas en robótica y visión artificial, o instrumentos optométricos y oftalmológicos, entre otros.

En nuestro caso concreto, además de continuar con el estudio sobre la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método *speckle*, tenemos previsto realizar un estudio comparativo de la calidad óptica de detectores CCD y CMOS mediante el método *speckle*. Por otra parte, estamos desarrollando actualmente, un método basado en la generación de patrones aleatorios presentados en la pantalla de cristal líquido (LCD) de un ordenador portátil. Hasta el momento, lo hemos aplicado para evaluar la calidad óptica de un sistema multispectral de adquisición de imágenes (Pozo *et al.*, 2008) y para evaluar la calidad óptica de lentes oftálmicas (los resultados se han



presentado en el “4th European Meeting in Visual and Physiological Optics”, Heraklion, Grecia, 2008).

Finalmente, en el marco del proyecto vigente “Caracterización óptica de superficies y dispositivos ópticos mediante patrones aleatorios” (FIS2007-66671-C02-02), tenemos previsto abordar el análisis de la rugosidad de superficies utilizando patrones *speckle* con cámaras CCD y CMOS, así como la caracterización goniométrica de pantallas LCD en términos de MTF mediante patrones aleatorios, entre algunos de los objetivos planteados.

## 10. REFERENCIAS

BACKMAN, S. M., MAKYNEN, A. J., KOLEHMAINEN, T. T., Y OJALA, K. M. 2004. Radom target method for fast MTF inspection. *Opt. Express* **12**(12), 2610-2615.

BOREMAN, G., Y DERENIAK, E. L. 1986. Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle. *Opt. Eng.* **25**(1), 148-150.

BOREMAN, G. D., SUN, Y., Y JAMES, A. B. 1990. Generation of laser speckle with an integrating sphere. *Opt. Eng.* **29**(4), 339-342.

BOYLE, W. S., Y SMITH, G. E. 1970. Charge Coupled Semiconductor Devices. *Bell Sys. Tech. J.*, **49**, 587-593.

CAMPANA, S. B. 1977. Techniques for evaluating charge coupled imagers. *Opt. Eng.* **16**(3), 267-274.

CAMPOS, J. Radiometric calibration of charge-coupled-device video cameras. 2000. *Metrologia* **37**, 459-464.

COLTMAN, J.W. 1954. The Specification of Imaging Properties by Response to a Sine Wave Input. *J. Opt. Soc. Am.* **44**(6), 468-471.

COOLEY, J. W., Y TUKEY, J. W. 1965. An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Math. Comput.* **19**(90), 297-301.

DAINTY, J. C. 1984. Statitiscal properties of laser speckle and related phenomena, en *Laser Spekle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed., Vol. 9 de *Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 35-40.

DANIELS, A., BOREMAN, G. D., DUCHARME, A. D., Y SAPIR, E. 1995. Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions. *Opt. Eng.* **34**(3), 860-868.

DUCHARME, A. D. 2007. Microlens diffusers for efficient laser speckle generation. *Opt. Express* **15**(22), 14573-14579.

DUCHARME, A. D., Y BOREMAN, G. D. 1995. Holographic elements for modulation transfer function testing of detector arrays. *Opt. Eng.* **34**(8), 2455-2458.

DUFFIEUX, P. M. 1946. *L'Intégrale de Fourier et ses Applications à l'Optique*. Rennes: S.A. des Imprimeries Oberthur.

ELIAS, P., GREY, D. S., Y ROBINSON, D. Z. 1952. Fourier Treatment of Optical Processes. *J. Opt. Soc. Am.*, **42**(2), 127-134.

ELIAS, P., GREY, D. S., Y ROBINSON, D. Z. 1953. Optics and Communication Theory. *Journal of the Optical Society of America*, **43**(4), 229-232.

FELTZ, J. C., Y KARIM M. A. 1990. Modulation transfer function of charge-coupled devices. *Appl. Opt.* **29**(5), 717-722.

FERNÁNDEZ-OLIVERAS, A., POZO, A. M., Y RUBIÑO, M. 2008. Análisis de la variación espectral de la MTF de videocámaras CCD mediante patrones de moteado láser. *Opt. Pura Apl.* **41**(3), 221-225.

FERRERO, A., CAMPOS, J., Y PONS, A. 2006a. Correction of photoresponse nonuniformity for matrix detectors based on prior compensation for their nonlinear behavior. *Appl. Opt.* **45**(11), 2422-2427.

FERRERO, A., CAMPOS, J., Y PONS, A. 2006b. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD. *Metrologia* **43**, S17-S21.

---

FERRERO, A., ALDA, J., CAMPOS, J., LÓPEZ-ALONSO, J. M., Y PONS, A. 2007. Principal components analysis of the photoresponse nonuniformity of a matrix detector. *Appl. Opt.* **46**(1), 9-17.

FRIEDENBERG, A. 2000. Sampling-interpolation modulation transfer function as the envelope of the interpolated output. *Opt. Eng.* **39**(2), 520-526.

FRIESER, H. 1938. Photographic Resolution of Lenticular Films. *Zeits. F. Wiss. Photogr.* **37**, 261.

GOLDFISCHER, L. I. 1965. Autocorrelation Function and Power Spectral Density of Laser-Produced Speckle Patterns. *J. Opt. Soc. Am.* **55**(3), 247-253.

GOODMAN, J. W. 1984. Statitiscal properties of laser speckle and related phenomena, en *Laser Spekle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed., Vol. 9 de *Topics in Applied Physics*, (Berlin: Springer-Verlag), pp. 35-40.

GREIVENKAMP, J. E., Y LOWMAN, A. E. 1994. Modulation transfer function measurements of sparse-array sensors using a self-calibrating fringe pattern. *Appl. Opt.* **33**(22), 5029-5036.

HOLST, G. C. 2006. *Electro-Optical Imaging System Performance*. 4<sup>a</sup> Ed., (Bellingham: JCD Publishing y SPIE PRESS).

HOLST, G. C. Y LOMHEIM, T. S. 2007a. *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*, (Bellingham: JCD Publishing y SPIE PRESS).

HOLST, G. C. Y LOMHEIM, T. S. 2007b. "CCD fundamentals", en *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*, (Bellingham: JCD Publishing y SPIE PRESS), pp. 43-85.

HOPKINS, H. H. 1950. *Wave Theory of Aberrations*. Oxford: Oxford Univ. Press.

HOPKINS, H. H. 1955a. The Frequency Response of a Defocused Optical System. *Proc. R. Soc. London Ser. A - Mathematical and Physical Sciences* **231**(1184), 91-103.

HOPKINS H. H. 1955b. Interferometric methods for the study of diffraction images. *Opt. Acta* **2**(1), 23-29.

HOPKINS, H. H. 1956. The Frequency Response of Optical Systems. *Proc. Phys. Soc. London Sec.B* **69**(5), 562-576.

HU, J., SONG, M., SUN, Y., Y LI, Y. 1999. Measurement of modulation transfer function of charge-coupled devices using frequency-variable sine grating patterns. *Opt. Eng.* **38**(7), 1200-1204.

KUBOTA, H., Y OHZU, H. 1957. Method of Measurement of Response Function by Means of Random Chart. *J. Opt. Soc. Am.* **47**(7), 666-667.

LERMAN, S. H. 1969. Application of the Fast Fourier Transform to the Calculation of the Optical Transfer Function. *SPIE Proc.* **13**, 51.

LETTINGTON, A. H., Y HONG, Q. H. 1993. Measurement of the discrete modulation transfer function. *J. Mod. Opt.* **40**(2), 203-212.

LEVI, L. 1983. Spatiotemporal transfer function: recent developments. *Appl. Opt.* **22**(24), 4038-4041.

LEVY, E., PELES, D., OPPER-LIPSON, M., Y LIPSON, S. G. 1999. Modulation transfer function of a lens measured with a random target method. *Appl. Opt.* **38**(4), 679-683.

LUNEBERG, R. K. *Mathematical Theory of Optics*. 1965. New York: Wiley-Interscience.

---

MARCHYWKA, M., Y SOCKER, D. G. 1992. Modulation transfer function measurement technique for small-pixel detectors. *Appl. Opt.* **31**(34), 7198-7213.

PARK, S. K., SCHOWENGERDT, R., Y KACZYNSKI, M. -A. 1984. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems. *Appl. Opt.* **23**(15), 2572-2582 (1984).

POSPÍŠIL, J., JAKUBÍK, P., Y MACHALA, L. 2005. Light-reflection random-target method for measurement of the modulation transfer function of a digital video-camera. *Optik* **116**, 573-585.

POZO, A. M., Y RUBIÑO, M. 2004. Caracterización óptica de cámaras CCD para medida del color. *Opt. Pura Apl.* **37**(1), 97-100.

POZO, A. M., Y RUBIÑO, M. 2005a. Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer function of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle. *Appl. Opt.* **44**(9), 1543-1547.

POZO, A. M., Y RUBIÑO, M. 2005b. Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern. *Appl. Opt.* **44**(36), 7744-7748.

POZO, A. M., FERNÁNDEZ-OLIVERAS, A., Y RUBIÑO, M. 2007. Random-pattern characterization of imaging systems used in Colorimetry, en *Ciencia y Tecnología del Color. Seminario 2007 de la Red Temática*, (Editores: Joaquín Campos Acosta y Rafael Huertas Roa, Red Temática “Ciencia y Tecnología del Color”, Granada, Spain), pp. 27-30.

POZO, A. M., FERNÁNDEZ-OLIVERAS, A., Y RUBIÑO, M. 2008. Evaluación de la calidad óptica de un sistema multispectral de adquisición de imágenes usando patrones de puntos aleatorios. *Opt. Pura Apl.* **41**(3), 215-219.

POZO, A. M., FERRERO, A., RUBIÑO, M., CAMPOS, J., Y PONS, A. 2006. Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method. *Opt. Express* **14**(13), 5928-5936.

REICHENBACH, S. E., PARK, S. K., Y NARAYANSWAMY. 1991. Characterizing digital image acquisition devices. *Opt. Eng.* **30**(2), 170-177.

ROSENHAUER, K., Y ROSENBRUCH. K. –J. 1967. The measurement of the optical transfer functions of lenses. *Rep. Prog. Phys.* **30**(1), 1-25.

SCHADE, O. H. 1948. Electro-Optical Characteristics of Television Systems. *R. C. A. Rev.*, **IX**, part II, Electro-Optical Specifications for Television Systems, pp. 245- 286.

SELWYN, E. W. H. 1948. The photographic and visual resolving power of lenses. *Photogr. J.*, **88B**, 6-12.

SENSIPER, M., BOREMAN, G. D., DUCHARME, A. D., Y SNYDER, D. R. 1993. Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle. *Opt. Eng.* **32**(2), 395-400.

SITTER, JR., D. N., GODDARD, J. S., Y FERRELL, R. K. 1995. Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from bar-target patterns. *Appl. Opt.* **34**(4), 746-751.

STRUTT, J. W. (Lord Rayleigh). 1879. Investigations in optics with special reference to the spectroscope. *Philos. Mag.* **5**(8), 261-274.

STRUTT, J. W. (Lord Rayleigh). 1896. On the theory of optical images with special reference to the microscope. *Philos. Mag.* **5**(42), 167-195.

TEIPEN, B. T., Y MACFARLANE, D. L. 2000. Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurements of charge-coupled-device video camera systems. *Appl. Opt.* **39**(4), 515-525.

THEUWISSEN, A. J. P. 1996a. "Fundamentals of Charge-Coupled Devices", en *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*, (Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers), pp. 7-51.

THEUWISSEN, A. J. P. 1996b. "Solid-state Imaging at a Glance", en *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*, (Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers), pp. 109-129.

WILLIAMS, C. S., Y BECKLUND, O. A. 1989. *Introduction to the Optical Transfer Function*. New York: John Wiley & Sons.

WITTENSTEIN, W., FONTANELLA, J. C., NEWBERRY, A. R., Y BAARS, J. 1982. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging systems. *Opt. Acta* **29**(1), 41-50.



## 10. Referencias

---

## **ANEXO I**



# Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer functions of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle

Antonio Manuel Pozo and Manuel Rubiño

Two methods for measuring the modulation transfer function (MTF) of a charge-coupled device (CCD) that are based on the generation of laser speckle are analyzed and compared. The method based on a single-slit aperture is a quick method, although the measurements are limited to values of less than the Nyquist frequency of the device. The double-slit method permits the measurement of values of as much as some 1.8 times the Nyquist frequency, although it is a slower method because of the necessity to move the CCD. The difference between the MTF values obtained with the two methods is less than 0.1 in magnitude; the root-mean-square error between the two curves is 0.046 (4.6%). © 2005 Optical Society of America

*OCIS codes:* 040.1520, 110.4100, 110.6150.

## 1. Introduction

In recent years the rapid development of semiconductor technology has facilitated the generalization of the use of devices to capture images based on matrices of semiconductor detectors, such as charge-coupled devices (CCDs).<sup>1</sup> CCD cameras are widely used in diverse fields of science and technology as a powerful tool with which to gather information from complex scenes. Examples include quality control in various industrial applications, measurement of the colors of objects, astrophysics, illumination (for characterizing the spatial distribution of light), and artificial vision.

The determination of the modulation transfer function (MTF) enables the image quality of a system to be evaluated and characterizes the spatial-frequency response of an imaging system.<sup>2,3</sup> The literature offers references to various methods of measuring the MTFs of CCDs that are essentially differentiated by type of target or pattern used as the object; however,

these methods have not been compared in great detail. Each of them presents advantages and disadvantages, and it remains to be determined which of them will provide the more comprehensive evaluation of image quality. Thus, for example, methods use bar targets,<sup>4</sup> random targets,<sup>5</sup> canted self-imaging targets,<sup>6</sup> interferometric fringes,<sup>7,8</sup> or laser-speckle patterns.<sup>9–11</sup> The last-named technique is relatively simple and versatile: The alignment of the system is not critical, the entire array is tested, and it does not require a lens to project the target.

Here we analyze and compare two techniques for measuring the MTFs of CCD arrays based on the generation of laser speckle, showing the advantages and drawbacks. We used two types of aperture: single- and double-slit apertures. With the single-slit aperture the MTF can be determined without the need to move the CCD, although this technique is limited by the Nyquist frequency of the device. When a double slit is used, the spatial-frequency interval can be extended to almost double the Nyquist frequency, although in this case it becomes necessary to move the CCD to cover the frequency range.<sup>10</sup>

## 2. Experimental Device

The experimental device (Fig. 1) is composed of a He–Ne laser source ( $\lambda = 632.8$  nm; 17 mW), an integrating sphere ( $\phi = 152.4$  mm), a linear polarizer, and an optical bench to hold the CCD, which is connected to a control card installed in a PC. The

---

A. M. Pozo (ampmolin@ugr.es) and M. Rubiño are with the Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias (Edificio Mecenaz), Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, 18071 Granada, Spain.

Received 29 July 2004; revised manuscript received 9 November 2004; accepted 11 November 2004.

0003-6935/05/091543-05\$15.00/0

© 2005 Optical Society of America

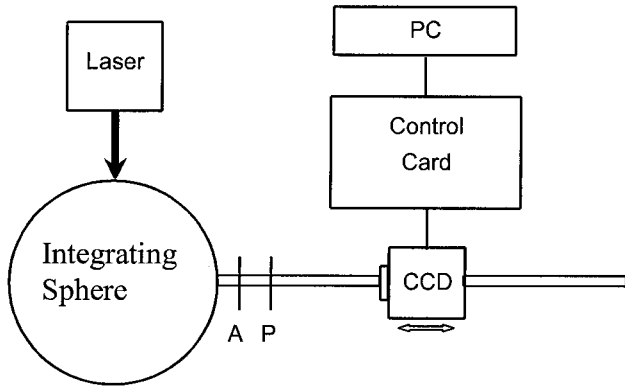


Fig. 1. Experimental setup for measurement of the MTF of the CCD. The output aperture of the integrating sphere is situated at aperture A (single or double slit) and polarizer P.

laser radiation is aimed at the input aperture of the integrating sphere, generating a speckle pattern at the output aperture. The radiation emerging from the output port of the integrating sphere exhibits uniform irradiance and a uniformly distributed phase of  $0-2\pi$ . Depending on the measurement method used, a single or a double slit is situated at the output aperture of the sphere; the slit determines the content in spatial frequency of the pattern registered in the CCD. After the single or double slit is selected, a polarizer is put into place to guarantee a linearly polarized speckle pattern. These conditions ensure that the power spectral density (PSD) of the speckle irradiance in the CCD is proportional to the autocorrelation of the transmission function of the aperture, plus a delta function of zero frequency.<sup>12,13</sup> The relationship between the PSDs is given by the expression

$$\text{PSD}_{\text{output}}(\xi, \eta) = [\text{MTF}(\xi, \eta)]^2 \text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta), \quad (1)$$

where  $\xi$  and  $\eta$  are the spatial frequencies that correspond to horizontal and vertical directions  $x$  and  $y$ , respectively. When the theoretical  $\text{PSD}_{\text{input}}$  is known for the slit in question, and the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  is measured by the CCD, it is possible to determine the MTF of the device by use of Eq. (1).

Given the geometry of the two apertures used,  $\text{PSD}_{\text{input}}$  in both cases can be separated into frequencies  $\xi$  and  $\eta$ . In the present study we consider  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi)$  and therefore have determined the horizontal MTF.

For the measurements we used a high-resolution CCD monochrome PixelFly array composed of a matrix of  $1360 \times 1024$  pixels (horizontal  $\times$  vertical) as well as a horizontal and a vertical interpixel spacing of  $4.65 \mu\text{m}$ . For processing the images, the appropriate software was developed by use of version 6.1 of the Matlab computer program.

#### A. Single-Slit Aperture

The transmission function of the aperture is given by

$$P(x, y) = \text{rect}(x/l_1)\text{rect}(y/l_2). \quad (2)$$

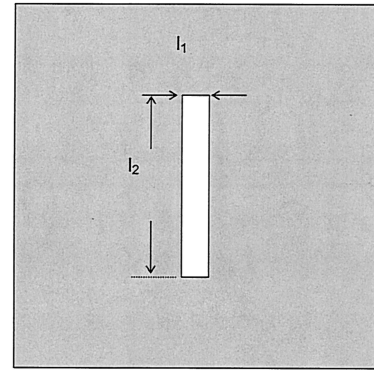


Fig. 2. Single-slit aperture:  $l_1 = 3 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 6 \text{ mm}$ .

Figure 2 shows the geometry that corresponds to the single-slit aperture used.

$\text{PSD}_{\text{input}}$  of the speckle irradiance in the CCD can be expressed as a delta function at zero frequency plus the normalized autocorrelation of  $P(x, y)$  (Refs. 12 and 13):

$$\text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta) = \langle I \rangle^2 \left[ \delta(\xi, \eta) + \left( \frac{\lambda z}{l_1} \right)^2 \text{tri}\left( \frac{\lambda z}{l_1} \xi \right) \text{tri}\left( \frac{\lambda z}{l_1} \eta \right) \right], \quad (3)$$

where  $\text{tri}(x) = 1 - |x|$  for  $|x| \leq 1$  and  $\text{tri}(x) = 0$  elsewhere and  $\langle I \rangle^2$  is the square of the average speckle irradiance.

As mentioned above, by virtue of the geometry of the single-slit aperture,  $\text{PSD}_{\text{input}}$  can be separated into the frequencies  $\xi$  and  $\eta$ , which correspond to the horizontal and vertical directions  $x$  and  $y$ , respectively. The one-dimensional  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi)$  is the  $\eta = 0$  profile of  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta)$ .

The Nyquist spatial frequency for a CCD with a center-to-center spacing  $\Delta x$  between the photoelements is given by  $\xi_{\text{Ny}} = 1/(2\Delta x)$ . The horizontal and vertical spacing between pixels of the CCD is  $4.65 \mu\text{m}$ , providing a Nyquist frequency of  $107.53 \text{ cycles/mm}$  in both directions.

Also, the expression

$$\xi = x/\lambda z \quad (4)$$

relates the spatial frequency to the aperture's horizontal dimension,  $x$ , and to the distance from the aperture to the observation plane,  $z$ . In addition, to prevent aliasing, the maximum frequency contained in the speckle pattern,  $\xi_{\text{cutoff}}$ , was chosen to equal the spatial Nyquist frequency of the CCD. Taking into account that  $\xi_{\text{cutoff}} = l_1/(\lambda z)$ , we get a separation distance of  $z = 44 \text{ mm}$  between the CCD and the aperture.

Furthermore, when the theoretical  $\text{PSD}_{\text{input}}$  is known for a single slit, the MTF of the CCD can be determined from Eq. (1).

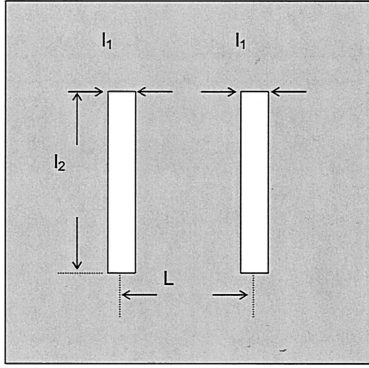


Fig. 3. Double-slit aperture:  $l_1 = 0.70$  mm,  $l_2 = 10$  mm,  $L = 7.3$  mm.

### B. Double-Slit Aperture

Figure 3 is a schematic of the narrowband aperture used. In this case the transmission function of the aperture is given by

$$P(x, y) = \text{rect}(x/l_1)\text{rect}(y/l_2) * [\delta(x + L/2) + \delta(x - L/2)], \quad (5)$$

where  $*$  is a convolution operator,  $l_1$  and  $l_2$  are, respectively, horizontal and vertical dimensions of the slits, and  $L$  is the spacing between them.

Each of the rectangular apertures of the double-slit aperture used is 0.70 mm wide and 10 mm tall, with a separation between centers of 7.3 mm.

$\text{PSD}_{\text{input}}$  of the speckle irradiance in the CCD can be expressed as a delta function at zero frequency plus the normalized autocorrelation of  $P(x, y)$ .<sup>12,13</sup> The two-dimensional input PSD can be written as

$$\text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta) = \langle I \rangle^2 \left\{ \delta(\xi, \eta) + \frac{1}{2} \frac{(\lambda z)^2}{l_1 l_2} \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_1} \xi\right) \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_2} \eta\right) + \frac{1}{4} \frac{(\lambda z)^2}{l_1 l_2} \text{tri}\left[\frac{\xi - L/(\lambda z)}{l_1/(\lambda z)}\right] \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_2} \eta\right) + \frac{1}{4} \frac{(\lambda z)^2}{l_1 l_2} \text{tri}\left[\frac{\xi + L/(\lambda z)}{l_1/(\lambda z)}\right] \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_2} \eta\right) \right\}. \quad (6)$$

As in the case of the single-slit aperture, the previous function can be separated into  $\xi$  and  $\eta$ . The one-dimensional  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi)$  is the  $\eta = 0$  profile of  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta)$ .

The double-slit aperture provides a peak at the PSD centered on a frequency that depends on the distance between the CCD and the aperture.<sup>10</sup> Thus the distance between the CCD and the aperture determines the spatial frequency that is being evaluated, such that at high frequencies the MTF is given when the CCD is near the aperture, whereas the low frequencies are achieved when the CCD is far away

from the aperture. It suffices to measure the maximum value of this peak after normalizing the PSD to the unit for zero frequency and taking the square root to establish the value of the MTF at the frequency that is being evaluated at that moment. The total number of measurements to determine the MTF by the method of double slit was 91. In both methods we determined the output spectrum by averaging a total of 10 images with the aim of minimizing the random variations caused by temporal noise.<sup>14</sup>

## 3. Data Processing

### A. Single-Slit Aperture

Once the CCD was set at a distance of 44 mm from the single-slit aperture as indicated in Subsection 2.A, the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  was determined in the following way: For a given digitized frame of speckle data with the background subtracted, a region of  $600 \times 600$  pixels was selected. Each horizontal row of data is a single observation of an ergodic random process. A fast Fourier transform was performed on each row of speckle data. The magnitude squared in one dimension provided a single estimate of the one-dimensional power spectrum,  $\text{PSD}_{\text{output}}(\xi)$ . These 600 spectra were ensemble averaged for a better signal-to-noise ratio in  $\text{PSD}_{\text{output}}(\xi)$ .<sup>14</sup> To reduce the noise even further, the average was taken for 10 frames.

Figure 4 shows a section of speckle pattern registered by the CCD and its corresponding PSD. The

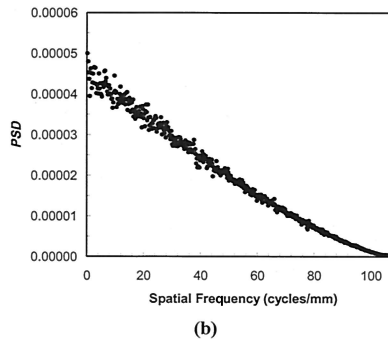
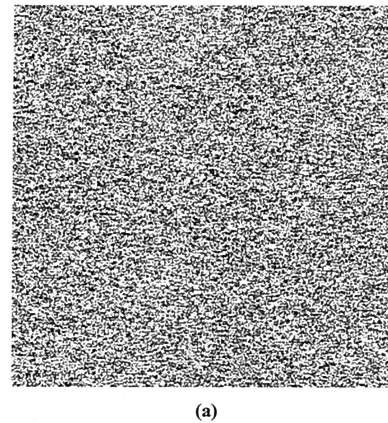


Fig. 4. (a) Speckle pattern with the single-slit aperture and (b) its corresponding  $\text{PSD}_{\text{output}}(\xi)$ .

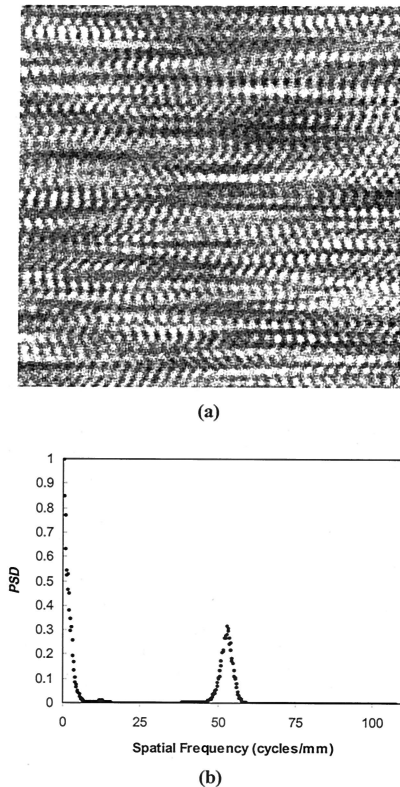


Fig. 5. (a) Speckle pattern with the double-slit aperture and (b) its corresponding  $PSD_{output}(\xi)$ .

frames are stored uncompressed in tiff format, with a 0.025-s integration time used for the CCD.

#### B. Double-Slit Aperture

The double-slit aperture gives a peak in the PSD centered at a frequency that depends on the distance between the CCD and the aperture. Thus the distance between the CCD and the aperture determines the spatial frequency that is being evaluated at each moment. For each position of the CCD, the image is processed as described in Subsection 3.A for the single-slit aperture. The frames are stored uncompressed in tiff format, with an integration time of 0.330 s used for the CCD. Figure 5 shows a speckle section and its corresponding PSD.

### 4. Results and Discussion

In a single-slit aperture the MTF is determined from a fit of  $PSD_{output}(\xi)$  [Fig. 4(a)] to a sixth-order polynomial ( $r = 0.994$ ). This curve best fits the experimental data throughout the range of spatial frequencies. Polynomials of lower orders provide good fits to the data that correspond to the low and medium frequencies but not to the high ones.

In a double-slit aperture the MTF is fitted to a second-order polynomial ( $r = 0.908$ ). Figure 6 presents the experimental data compiled with the double-slit aperture, together with the curve fitted to a second-order polynomial. Meanwhile, Fig. 7 com-

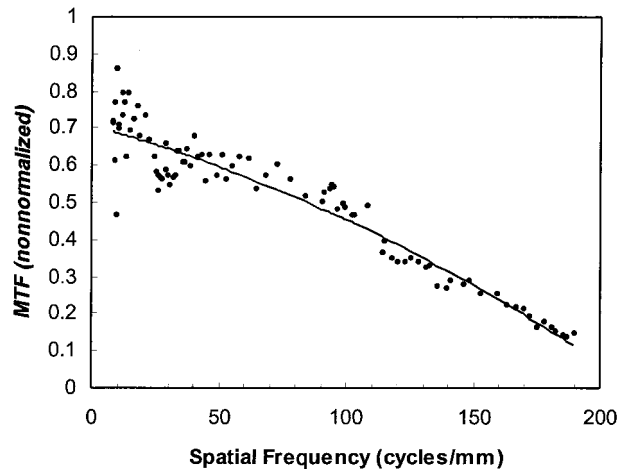


Fig. 6.  $MTF(\xi)$  of the CCD determined with the double-slit aperture. Solid curve, fit to the experimental data.

pares the normalized curves of the MTF of the CCD drawn from single- and double-slit apertures.

As shown in Fig. 7, the two methods analyzed give different MTF values of the CCD detector. With the method of the single-slit aperture it is possible to measure the MTF only for spatial frequencies lower than the Nyquist frequency, giving MTF values higher than those of the double-slit method (except near the Nyquist frequency). With the second method the interval of spatial frequencies can be extended to some 1.8 times the Nyquist frequency, offering a more comprehensive characterization of the device, although it has the drawback of being a slower measurement method because it is necessary to move the CCD. With the single-slit method the reason for the appreciable increase in the MTF values near the Nyquist frequency is that in this zone  $PSD_{input}$  approaches zero, whereas the output spectrum still has a finite value owing to the noise of the CCD.<sup>9</sup> On elimination of this growing stretch of the MTF (considering only the frequencies up to 102.70 c/mm), the

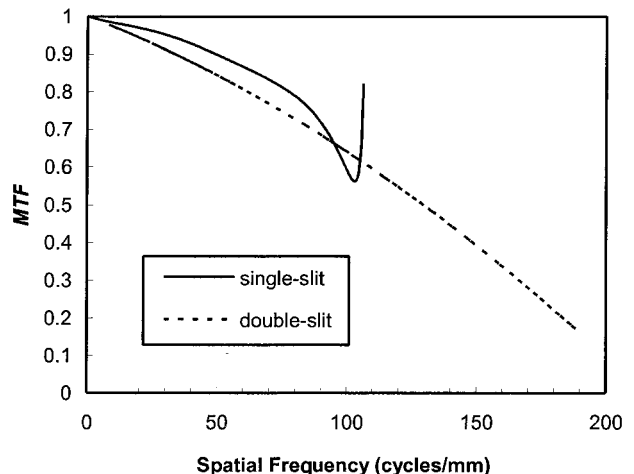


Fig. 7.  $MTF(\xi)$  of the CCD determined with two different apertures by the speckle method.

difference between the MTF values of the two curves is consistently less than 0.1 in magnitude, and the root-mean-square error between the two curves is 0.046.

## 5. Conclusions

We have analyzed two methods of measuring the MTFs of CCD arrays based on the generation of speckle by an integrating sphere. The two methods were compared quantitatively, and the advantages and disadvantages of each were demonstrated. With the double-slit aperture we succeeded in measuring the MTF of the CCD for spatial frequencies of zero to 1.8 times the Nyquist frequency of the CCD, in general providing values lower than those of the single-slit aperture.

The authors express their appreciation to the Ministerio de Ciencia y Tecnología, Spain, for financing project DPI2001-1174-C02-02.

## References

1. G. C. Holst, *CCD Arrays, Cameras, and Displays*, 2nd ed., Vol. PM142 of SPIE Press Monographs (SPIE Press, Bellingham, Wash., 1996).
2. J. C. Feltz and M. A. Karim, "Modulation transfer function of charge-coupled devices," *Appl. Opt.* **29**, 717–722 (1990).
3. S. K. Park, R. Schowengerdt, and M. Kaczynski, "Modulation-transfer-function analysis for sampled image system," *Appl. Opt.* **23**, 2572–2582 (1984).
4. D. N. Sitter, Jr., J. S. Goddard, and R. K. Ferrell, "Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from bar-target patterns," *Appl. Opt.* **34**, 746–751 (1995).
5. A. Daniels, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and E. Sapir, "Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions," *Opt. Eng.* **34**, 860–868 (1995).
6. N. Guérineau, J. Primot, M. Tauvy, and M. Caes, "Modulation transfer function measurement of an infrared focal plane array by use of the self-imaging property of a canted periodic target," *Appl. Opt.* **38**, 631–637 (1999).
7. M. Marchywka and D. G. Socker, "Modulation transfer function measurement techniques for small-pixel detectors," *Appl. Opt.* **31**, 7198–7213 (1992).
8. J. E. Greivenkamp and A. E. Lowman, "Modulation transfer function measurements of sparse-array sensors using a self-calibrating fringe pattern," *Appl. Opt.* **33**, 5029–5036 (1994).
9. G. D. Boreman, Y. Sun, and A. B. James, "Generation of laser speckle with an integrating sphere," *Opt. Eng.* **29**, 339–342 (1990).
10. M. Sensiper, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and D. R. Snyder, "Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle," *Opt. Eng.* **32**, 395–400 (1993).
11. G. Boreman and E. L. Dereniak, "Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle," *Opt. Eng.* **25**, 148–150 (1986).
12. J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle and related phenomena," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed., Vol. 9 of Topics in Applied Physics (Springer-Verlag, Berlin, 1984), pp. 35–40.
13. L. I. Goldfischer, "Autocorrelation function and power spectral density of laser-produced speckle patterns," *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 247–253 (1965).
14. G. D. Boreman, "Fourier spectrum techniques for characterization of spatial noise in imaging arrays," *Opt. Eng.* **26**, 985–991 (1987).





# Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method

A. M. Pozo<sup>1</sup>, A. Ferrero<sup>2</sup>, M. Rubiño<sup>1</sup>, J. Campos<sup>2</sup> and A. Pons<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada 18071, Spain*  
[ampmolin@ugr.es](mailto:ampmolin@ugr.es), [mrlopez@ugr.es](mailto:mrlopez@ugr.es)

<sup>2</sup>*Instituto de Física Aplicada, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid 28006, Spain*  
[aferrero@ifa.cetef.csic.es](mailto:aferrero@ifa.cetef.csic.es), [jcampos@ifa.cetef.csic.es](mailto:jcampos@ifa.cetef.csic.es), [apons@ifa.cetef.csic.es](mailto:apons@ifa.cetef.csic.es)

**Abstract:** We present and evaluate two corrections applicable in determining the modulation transfer function (MTF) of a charge-coupled device (CCD) by the speckle method that minimize its uncertainty: one for the low frequency region and another for the high frequency region. The correction at the low-spatial-frequency region enables attenuation of the high power-spectral-density values that arise from the field and CCD response non-uniformities. In the high-spatial-frequency region the results show that the distance between the CCD and the aperture is critical and significantly influences the MTF; a variation of 1 mm in the distance can cause a root-mean-square error in the MTF higher than 10%. We propose a simple correction that minimizes the experimental error committed in positioning the CCD and that diminishes the error to 0.43%.

©2006 Optical Society of America

**OCIS codes:** (040.1520) CCD, charge-coupled device; (110.4100) Modulation transfer function; (110.6150) Speckle imaging

---

## References and links

1. J. C. Feltz and M. A. Karim, "Modulation transfer function of charge-coupled devices," *Appl. Opt.* **29**, 717-722 (1990).
2. S. K. Park, R. Schowengerdt, and M. A. Kaczynski, "Modulation-transfer-function analysis for sampled image system," *Appl. Opt.* **23**, 2572-2582 (1984).
3. A. Daniels, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and E. Sapir, "Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions," *Opt. Eng.* **34**, 860-868 (1995).
4. S. M. Backman, A. J. Makynen, T. T. Kolehmainen, and K. M. Ojala, "Random target method for fast MTF inspection," *Opt. Express* **12**, 2610-2615 (2004).
5. E. Levy, D. Peles, M. Opher-Lipson, and S. G. Lipson, "Modulation transfer function of a lens measured with a random target method," *Appl. Opt.* **38**, 679-683 (1999).
6. G. D. Boreman and E. L. Dereniak, "Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle," *Opt. Eng.* **25**, 148-150 (1986).
7. G. D. Boreman, Y. Sun, and A. B. James, "Generation of laser speckle with an integrating sphere," *Opt. Eng.* **29**, 339-342 (1990).
8. A. M. Pozo and M. Rubiño, "Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern," *Appl. Opt.* **44**, 7744-7748 (2005).
9. M. Sensiper, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and D. R. Snyder, "Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle," *Opt. Eng.* **32**, 395-400 (1993).
10. A. M. Pozo and M. Rubiño, "Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer functions of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle," *Appl. Opt.* **44**, 1543-1547 (2005).
11. J. R. Janesick, *Scientific Charge-Coupled Devices* (SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001), Chap. 4.
12. A. Ferrero, J. Campos, and A. Pons, "Correction of photoresponse nonuniformity for matrix detectors based on prior compensation for their nonlinear behavior," *Appl. Opt.* **45**, 2422-2427 (2006).
13. A. F. Milton, F. R. Barone, and M. R. Kruer, "Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance," *Opt. Eng.* **24**, 855-862 (1985).

14. M. Schulz and L. Caldwell, "Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays," *Infrared Phys. Technol.* **36**, 763-777 (1995).
  15. D. L. Perry and E. L. Dereniak, "Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors," *Opt. Eng.* **32**, 1854-1859 (1993).
  16. T. S. McKechnie, "Speckle reduction," in *Laser speckle and related phenomena*, Vol. 9 of Topics in Applied Physics, J. C. Dainty, ed. (Springer-Verlag, New York, 1984).
  17. E. Schröder, "Elimination of granulation in laser beam projections by means of moving diffusers," *Opt. Commun.* **3**, 68-72 (1971).
  18. G. D. Boreman, "Fourier spectrum techniques for characterization of spatial noise in imaging arrays," *Opt. Eng.* **26**, 985-991 (1987).
- 

## 1. Introduction

The determination of the modulation transfer function (MTF) enables the evaluation of image quality of a system and characterizes the spatial-frequency response of an imaging system [1, 2]. One of the methods used consists of using random patterns, which can be generated in different ways: with transparency targets [3, 4], with a monitor [5] or by the generation of speckle by using a diffuser [6] or an integrating sphere [7, 8]. The main advantages of the speckle method are that the entire array is tested, it does not require a lens to project the test, and the speckle is positioned randomly in the array of pixels of the charge-coupled device (CCD).

Speckle is an interference phenomenon produced when coherent radiation is scattered from a rough surface. In the present work, we have used a transmissive diffuser to generate the speckle pattern. An aperture situated in front of the diffuser enables us to specify the content of spatial frequencies of the speckle pattern. Two of the apertures used to date have been the single-slit [6, 7] and double-slit [9]. Both present advantages and drawbacks [10]. With a double-slit, the spatial frequency interval can be extended to almost double the Nyquist frequency of the CCD, although in this case it becomes necessary to move the CCD to cover the frequency range. When a single-slit aperture is used, the MTF can be determined without the need to move the CCD, although this technique is limited by the Nyquist frequency of the device [9].

In this work, we analyse experimental factors affecting the determination of the power spectral density (PSD) from which the MTF is determined by using the speckle method with a single-slit and show that some experimental corrections can be applied to improve the MTF calculation.

First, we analysed the low-spatial-frequency region of the PSD. Boreman *et al.* [7] measured the MTF of a charge-injection device using an integrating sphere to generate the speckle. Figures 6 and 7 of their work show high values of the PSD at the low-spatial-frequency region, but they did not investigate the cause for this fact. In our work, we identified the reason for this phenomenon and show that the high values of the output power spectral density ( $PSD_{\text{output}}$ ) at low spatial frequencies are due to the spatial non-uniformity in the CCD response and the non-uniformity of the field without considering the speckle. Furthermore, we show in this work that it is possible to attenuate the high values of the  $PSD_{\text{output}}$ , due to this lack of uniformity, enabling a fit of the  $PSD_{\text{output}}$  to a polynomial function. To date, the influence of a correction of non-uniformity of response of this type has not been investigated in the determination of the MTF by the speckle method.

Secondly, we have investigated how the MTF is influenced by the uncertainty in the positioning of the distance between the CCD and the aperture. In the case of the single-slit aperture, the MTF can be determined from a single measurement, but the CCD must be situated at a distance from the aperture in such a way that the maximum input spatial frequency is equal to the Nyquist frequency of the CCD [6, 7]. In this way, the MTF can be determined in the largest possible frequency range and thus aliasing is avoided. However, to date no study examines how the MTF can be affected by the experimental error in establishing the distance between the CCD and the aperture, which is an important problem since the CCD

surface is not usually reachable because a window protects it and, consequently, it is difficult to know the distance to the aperture accurately. In the present work, we investigate this issue, analysing how the MTF is affected by small variations in the distance between the CCD and the aperture. The results show that the distance between the CCD and the aperture is critical and influences the fit of the experimental data. We propose a simple correction in the high-spatial-frequency region that enables a determination of the MTF with low uncertainty. Furthermore, by applying the correction that we propose here, the MTF is not affected by small variations in the position of the CCD with respect to the aperture.

## 2. Theoretical background

The MTF of the CCD can be determined from the PSDs of the speckle pattern by the expression [7]

$$PSD_{output}(\xi, \eta) = [MTF(\xi, \eta)]^2 PSD_{input}(\xi, \eta), \quad (1)$$

where  $\xi, \eta$  are the spatial frequencies corresponding to the horizontal and vertical directions, respectively;  $PSD_{output}$  is the PSD determined from the speckle pattern captured with the CCD, and it is proportional to the squared magnitude of the Fourier transform of the speckle pattern;  $PSD_{input}$  is the theoretical PSD, known for a single slit and given by

$$PSD_{input}(\xi, \eta) = \langle I \rangle^2 \left[ \delta(\xi, \eta) + \frac{(\lambda z)^2}{l_1 l_2} \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_1} \xi\right) \text{tri}\left(\frac{\lambda z}{l_2} \eta\right) \right], \quad (2)$$

where  $\text{tri}(X) = 1 - |X|$  for  $|X| \leq 1$  and zero elsewhere,  $\langle I \rangle^2$  is the square of the average speckle irradiance,  $\delta(\xi, \eta)$  is a delta function,  $l_1$  and  $l_2$  are, respectively, horizontal and vertical dimensions of the single-slit,  $\lambda$  is wavelength of the laser, and  $z$  is the distance between the slit and the CCD. By virtue of the geometry of the single slit, the MTF can be determined independently for the directions  $x$  and  $y$ . In the present work, we have only determined the horizontal MTF to show the corrections that we propose. This can be done in a similar way for the vertical direction.

The total MTF of the CCD can be expressed as the product of three components [11]: integration MTF ( $MTF_I$ ), diffusion MTF ( $MTF_D$ ), and charge transfer efficiency MTF ( $MTF_{CTE}$ ), attending to the processes that originate them:

$$MTF_{TOTAL} = MTF_I MTF_D MTF_{CTE}. \quad (3)$$

$MTF_I$  is a fixed modulation loss that is specific to the geometry of the pixel.  $MTF_D$  is dependent on the depth of the pixels and occurs because charge generated under a pixel diffuse to a neighbouring one.  $MTF_{CTE}$  is a consequence of the inefficiency in charge transfer from pixel to pixel. The  $MTF_I$  is given by

$$MTF_I = \frac{\sin\left(\frac{\pi \xi \Delta x}{2 \xi_{Ny} x}\right)}{\frac{\pi \xi \Delta x}{2 \xi_{Ny} x}}, \quad (4)$$

where the pixel has an open aperture of length  $\Delta x$  that is repeated with periodicity or pixel pitch  $x$ ,  $\xi$  is the spatial frequency, and  $\xi_{Ny}$  is the Nyquist frequency of the CCD. In the CCD that we used  $\Delta x = x$ . The MTF measured is affected by the components  $MTF_I$ ,  $MTF_D$  and  $MTF_{CTE}$ , being  $MTF_I$  the fundamental limit.

### 3. Experimental device and data processing

#### 3.1 Experimental device

Figure 1 presents the experimental device used, composed of a dye laser source tuned at 612.8 nm and emitting 100 mW, a lens to expand the laser beam (not shown in the figure), a rotating transmissive diffuser (R) to correct the response non-uniformity, a fixed transmissive diffuser (D) to generate the speckle pattern, an aperture (A), a polarizer (P) to provide a linearly polarized laser-speckle pattern, and finally a CCD detector connected to a control card installed in a personal computer. We used a single-slit aperture 1mm wide and 6mm high. For the image processing, the necessary software was developed using MATLAB.

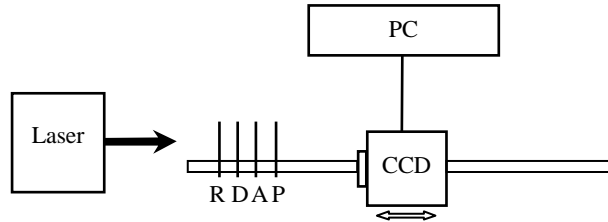


Fig. 1. Experimental set-up for the measurement of the MTF of the CCD. R is a rotating transmissive diffuser, D is a fixed transmissive diffuser, A is a single-slit aperture, P is a polarizer.

The CCD used was VGA of 640×480 pixels squared (horizontal x vertical) with a pixel pitch of 9.9  $\mu\text{m}$ . The Nyquist frequency of the CCD,  $\xi_{Ny}$ , is given by  $\xi_{Ny} = 1/(2x)$ , 50.5 cycles/mm, in our case.

#### 3.2 Correction at low spatial frequencies

The speckle pattern captured by the CCD imager suffers from the own spatial noise of the CCD and from the optical field non-uniformity underlying the speckle interference pattern, and both must be corrected to avoid experimental errors. With respect to the spatial noise of a CCD, a distinction can be made between the fixed pattern noise (FPN) and the photoresponse non-uniformity (PRNU). The FPN refers to the pixel-to-pixel variation that occurs when the array is in the dark—that is, it is a signal-independent noise. The PRNU is due to the difference of response of each pixel to a given signal; it is therefore a signal-dependent noise. These two types of non-uniformities have been corrected by the characterization of the CCD in use [12-15]. The FPN characterization is made by obscuring the CCD and capturing the dark image. Afterwards, the dark image is subtracted from the speckle image. The PRNU can be characterized by using a uniform irradiance field on the CCD. As the speckle does not occur with incoherent illumination, the speckle can be minimized simply by reducing sufficiently the temporal coherence or the spatial coherence [16]. In the present work, we used a technique based on the reduction of spatial coherence to minimize the speckle and to have a uniform field over the CCD. This technique consists of interposing a rotating diffuser in the path of a coherent beam to produce a random-phase modulation [17]. Figure 1 shows the situation of the rotating diffuser. The corrected speckle frame was finally derived by the expression

$$(Speckle_{corrected})_{i,j} = \frac{(Speckle_{raw})_{i,j} - (Dark)_{i,j}}{\frac{(Flat)_{i,j} - (Dark)_{i,j}}{\langle (Flat)_{i,j} - (Dark)_{i,j} \rangle}}, \quad (5)$$

where  $\langle \rangle$  indicates the mean spatial value and  $i, j$  are the coordinates of each pixel in the directions  $x$  and  $y$ , respectively. By ‘*Speckle<sub>corrected</sub>*’, we refer to the final corrected frame, ‘*Dark*’ is the image captured with the CCD occluded and which characterizes the FPN, ‘*Speckle<sub>raw</sub>*’ is the image taken with the rotating diffuser stopped, and ‘*Flat*’ is the frame captured with the rotating diffuser in movement which jointly characterizes the PRNU and the non-uniformity produced by the slit.

To reduce the temporal noise [18], we averaged the *speckle<sub>raw</sub>* images and flat images over 400 frames, while the dark images were averaged over 100 frames only since their noise is lower. For the measurements, we used an integration time of 10 ms for the CCD. Section 4 presents the differences found between the corrected and uncorrected  $PSD_{output}$ .

Once the corrected speckle frame is obtained, we calculate the squared magnitude of the Fourier transform of each row of the frame by the fast Fourier transform algorithm. The result was averaged over all the rows of the speckle pattern to reduce even more the temporal noise [18]. In this way, the  $PSD_{output}$  is determined. Finally, applying Eqs. (1-2), it is possible to determine the MTF of the CCD.

### 3.3 Correction at high spatial frequencies

The problem of correctly determining the MTF by the single-slit speckle method is rooted in situating the CCD at the appropriate distance with respect to the aperture so that the maximum spatial frequency contained in the speckle pattern is equal to the Nyquist frequency of the CCD. The distance  $z$  between the CCD and the aperture can be calculated by the expression

$$z = \frac{l_1}{\lambda \xi_{Ny}}, \quad (6)$$

where  $l_1$  is the slit width,  $\lambda$  the wavelength of the laser, and  $\xi_{Ny}$  the Nyquist frequency of the CCD. In our case, we get  $z = 32.3$  mm. This value of  $z$  really corresponds to the distance between the slit and the CCD plane where the pixels are found. However, the surface of the pixels is not accessible because it is protected by a window. Besides, neither the distance from the window to the surface, neither the thickness of the window and its refractive index are known. Therefore, it is difficult to place the CCD at exactly the correct distance from the aperture, this being the cause of a systematic error in the high-frequency range of the  $PSD_{output}$ . Studying this error, we have placed the external face of the protective window at distance slightly shorter than  $z$  from the aperture and have measured the  $PSD_{output}$  at this distance and another around it. It is worth remarking that, for the CCD under study, the protective window is very close to the surface of the pixels.

In the following section, we show the influence exerted on the MTF by small variations in the position of the CCD with respect to the slit, and the results found with the correction that we propose, which consists of subtracting the baseline level in the fit of the  $PSD_{output}$ .

## 4. Results and discussion

In Fig. 2(a), the  $PSD_{output}$  determined for the speckle pattern without correcting the response non-uniformity is shown against the spatial frequency normalized to the Nyquist frequency. It bears noting the high values obtained at low spatial frequencies for the  $PSD_{output}$  that impede to fit a low order polynomial to the experimental data. These high values are found below the normalized frequency 0.0125, which is equivalent to 0.63 cycles/mm.

Figure 2(b) shows the  $PSD_{output}$  on applying the correction of the response non-uniformity [Eq. (5)] to the speckle pattern. Comparing Figs. 2(a) and 2(b), we do not get high  $PSD_{output}$  values at low frequencies when the correction of the response non-uniformity is used.

To investigate the influence in the  $PSD_{output}$  of varying the distance between the CCD and the slit, we measured the  $PSD_{output}$  at 3 different distances between the window of the CCD and the aperture. The first distance chosen between the window and the aperture was 31.8 mm, very close to the value of  $z$  obtained from Eq. (6) for the CCD under study. Figure 3

provides a representation of the replicated  $\text{PSD}_{\text{output}}$  which clearly shows the aliasing. For this distance, the Nyquist frequency is still not reached because the overlap has still not occurred, and therefore the cut-off frequency of the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  is lower than the Nyquist frequency of the CCD. It would thus be necessary to further reduce the distance between the CCD and the aperture and because of that two more measurements were done at 30.8 mm and 29.8 mm.

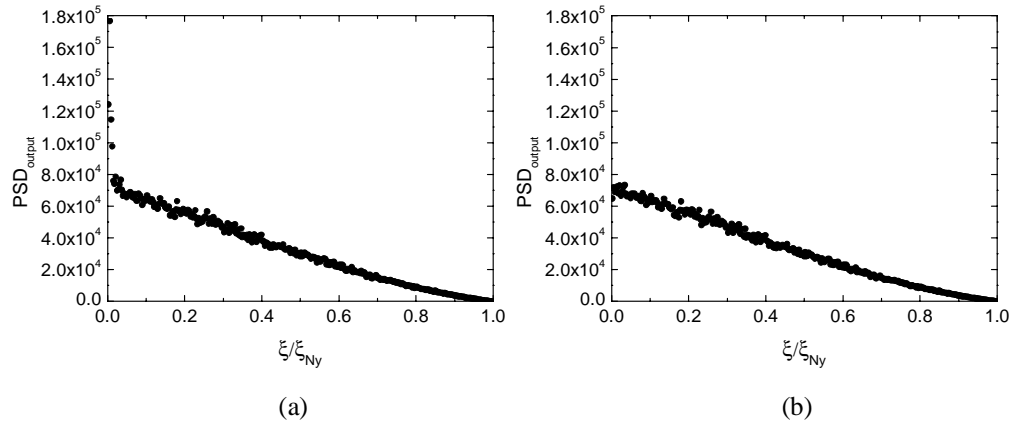


Fig. 2. PSDs determined for a distance of 30.8 mm between the window of the CCD and the single-slit aperture (a) without correction of response non-uniformity and (b) with correction. On the abscissa axis, the spatial frequency is normalized to the Nyquist frequency of the CCD (50.5 cycles/mm).

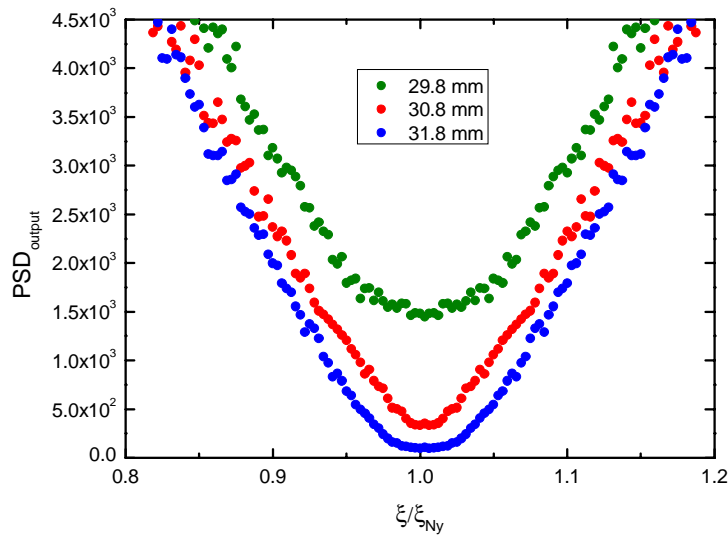


Fig. 3. Detail of PSDs found at three different distances between the window of the CCD and the single-slit aperture. Represented on the abscissa axis is the spatial frequency normalized to the Nyquist frequency of the CCD.

Figure 3 shows that as the distance between the CCD and the slit diminishes, the minimum of the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  begins to increase due to the overlap of the two branches of the spectrum. The correction that we propose here consists of subtracting this minimum value (corresponding to the Nyquist frequency) that can be considered as a baseline value, to the fitted curve of the  $\text{PSD}_{\text{output}}$ . This subtraction should be done when the overlap of the two branches begins.

Once the speckle frame is corrected by Eq. (5), we get the MTF from the  $PSD_{output}$ , following the procedure of Boreman *et al.* [7]. The PSDs corresponding to 29.8 , 30.8 and 31.8 mm fit to third-order polynomials with correlation coefficients of 0.995, 0.996, and 0.995, respectively. After this, it suffices to use Eqs. (1-2) to calculate the MTF (Fig. 4). This figure reveals that different curves result for the different CCD positions. To quantify the deviation between the curves, we calculated the root mean square (rms) error. The rms between the MTF at 29.8 mm and the MTF at 30.8 mm was 10.6%, between the MTF at 29.8 mm and MTF at 31.8 mm it was 16.0% and the rms error between MTF at 30.8 mm and MTF at 31.8 mm was 5.6%.

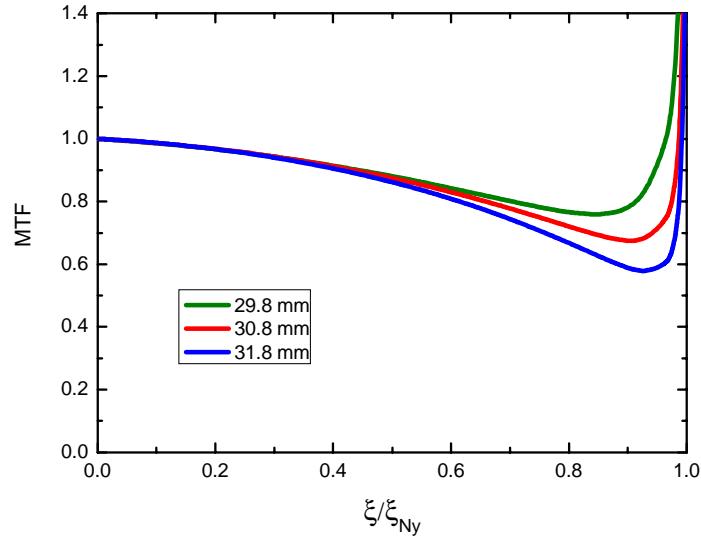


Fig. 4. MTFs of the CCD determined from the PSDs shown in Fig. 3. On the abscissa axis, the spatial frequency is normalized to the Nyquist frequency of the CCD.

As mentioned above, the correction that we propose consists of subtracting the baseline value (corresponding to the Nyquist frequency) in the fitted PSDs once the overlapping begins in the replicated  $PSD_{output}$ . Figure 5 shows the MTFs calculated after applying correction for the distances of 29.8 mm and 30.8 mm, and the MTF calculated for 31.8 mm are compared. We can see how both MTFs are much closer now than before correcting them. The rms error between the corrected MTFs is only 0.43%, while without correction it was 10.6%. In view of these results, we conclude that the correction proposed minimizes the influence of the error committed on positioning the CCD with respect to the aperture. In addition, this correction presents the advantage that eliminates the growing part in the MTF near the Nyquist frequency (compare Figs. 4 and 5) and therefore permits the characterization of the CCD up to the Nyquist frequency.

It is important to note that the objective of the correction proposed here is not to remove nor to analyse the aliasing of the speckle pattern, but rather to minimize the influence of the aliasing in the measurement of the MTF. The influence of the aliasing in the  $PSD_{output}$  depends on the method used to measure the MTF, since the  $PSD_{output}$  depends on the pattern used as the input signal. In our case, as shown in Fig. 3, the main effect that the aliasing causes in the  $PSD_{output}$  due to the error committed experimentally on positioning the CCD is equivalent to an increase in the baseline level. In effect, on diminishing the distance between the CCD and the aperture, the speckle pattern contains frequencies higher than the Nyquist frequency, which are aliased to lower frequencies. Because of this, the baseline level of the



$PSD_{\text{output}}$  increases. The results shown in Fig. 4 confirm experimentally that the increase in the baseline level due to the aliasing is the main cause of the dispersion of the MTF values at high frequencies. By applying the correction that we propose here, the MTF is not affected by small variations in the position of the CCD with respect to the aperture, as shown in Fig. 5. This does not mean that the aliasing of the speckle pattern has been removed on applying this correction, but rather that the influence of the aliasing has been minimized in order to measure the MTF with low uncertainty.

Figure 5 also presents the integration MTF. All MTFs determined experimentally were found below the  $MTF_I$ , as was necessary, given that the  $MTF_I$  sets the theoretical limit for MTF performance. The differences between the experimental MTFs and the  $MTF_I$  were due to the components  $MTF_D$  and  $MTF_{CTE}$  of Eq. (3). It might be expected for  $MTF_D$  to be noticeable in this CCD, since pixels are small and charge may diffuse to neighboring pixels. It might also be expected for the  $MTF_{CTE}$  to be noticeable, since the CCD has a large number of pixels and there are many charge transfers involved.

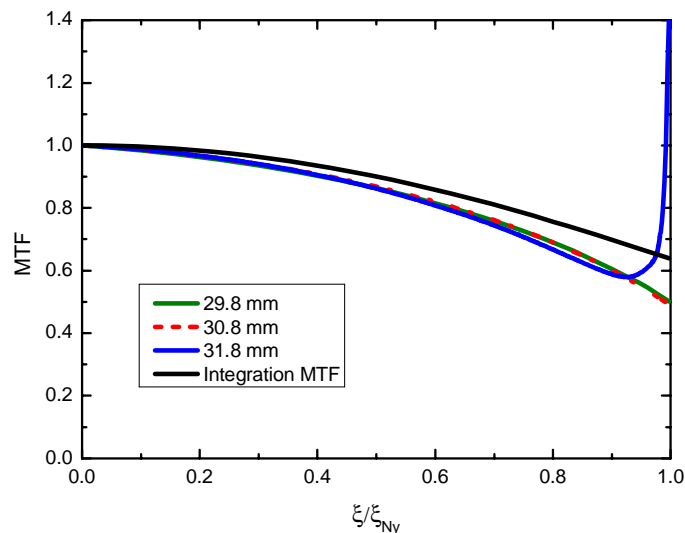


Fig. 5. MTFs for distances of 29.8 mm and 30.8 mm between the window of the CCD and the aperture determined after applying the correction of the baseline value. Also represented is the MTF (without correction) for a distance of 31.8 mm between the window of the CCD and the aperture. Integration MTF sets the theoretical limit for MTF performance. On the abscissa axis the spatial frequency normalized to the Nyquist frequency of the CCD is represented.

## 5. Conclusions

In this work, we analysed experimental factors affecting the determination of the PSD from which the MTF is determined by using the speckle method with a single-slit. Furthermore, we have proposed two improvements of the method of measuring the MTF of CCDs by speckle patterns. First, we analysed the low spatial frequencies. We showed that the high values of the  $PSD_{\text{output}}$  are due to a non-uniformity of response. By correcting the non-uniformity of the response the  $PSD_{\text{output}}$  peak at low frequency disappears and a low order polynomial can be fitted to the  $PSD_{\text{output}}$  to calculate the MTF. Secondly, we have analysed the region of high spatial frequencies. Our results show that the distance between the CCD and the aperture is critical. The imprecision in experimentally establishing the distance between the CCD and the aperture influences the fit of the MTF. A slight variation (on the order of 1 mm) in the position of the CCD with respect to the aperture causes a root-mean-square error of 10.6%

between MTFs. After a simple correction consisting of subtracting the baseline level in the fitted  $\text{PSD}_{\text{output}}$ , the root-mean-squared error between MTFs determined at different positions is reduced up to 0.43%. This correction minimizes therefore the influence of the error committed experimentally on positioning the CCD with respect to the aperture, and permits furthermore to characterize the CCD up to the Nyquist frequency. These two corrections should be taken into account when determining the MTF of CCDs by the single-slit speckle method with low uncertainty.

### **Acknowledgments**

The authors express their appreciation to the Ministerio de Ciencia y Tecnología for financing projects FIS2004-06465-C02-01 and FIS2004-06465-C02-02.



# Optical characterization of ophthalmic lenses by means of modulation transfer function determination from a laser speckle pattern

Antonio Manuel Pozo and Manuel Rubiño

A method is presented for measuring the modulation transfer function of ophthalmic lenses by use of the generation of laser speckle with an integrating sphere. The measurements are performed with a rectangular double-slit aperture positioned at the output port of the integrating sphere. The distance between the lens and the detector determines the spatial frequency being tested; therefore high frequencies are tested close to the lens and low frequencies are tested far away from the lens. We can conclude that the double-slit method can be a versatile technique for comparing the optical quality of ophthalmic lenses from different makers. © 2005 Optical Society of America

OCIS codes: 040.1520, 110.4100, 110.6150, 220.4840.

## 1. Introduction

The determination of the modulation transfer function (MTF) enables us to evaluate the image quality of a system and to characterize the spatial-frequency response of an imaging system.<sup>1,2</sup>

For measuring this function, the literature offers different methods that differ essentially in the type of target used as the object. One of the methods is based on the use of random patterns. These patterns can be generated in many ways: for example, on a computer screen<sup>3</sup> or by use of random transparency targets<sup>4</sup> or laser speckle patterns.<sup>5,6</sup>

The present work presents a method for measuring the MTF of ophthalmic lenses by the generation of laser speckle with an integrating sphere. The laser radiation at the output port of the sphere passes through a double-slit aperture, which determines the spatial-frequency content of the speckle pattern that falls on the charge-coupled device (CCD). The MTF is measured for lenses of two different manufacturers (M1 and M2), and the results are compared.

In this work, we do not attempt to simulate the

conditions of vision. When the lens is combined with the eye, the optical performance of the complete system can be investigated by a separate analysis of the lens and the eye.<sup>7</sup> In terms of the MTF, one can determine the MTF of the complete system ( $MTF_{total}$ ) in a simple way by multiplying the MTF of each subsystem by using

$$MTF_{total} = MTF_{CCD} MTF_{lens} MTF_{eye}. \quad (1)$$

The influence of visual parameters such as pupil size, distance of vision, or ocular aberrations can be taken into account in the  $MTF_{eye}$  term. In addition, the factor  $MTF_{eye}$  can be determined by other procedures—for example, from physiological eye models<sup>8</sup> or with the Hartmann–Shack sensor.<sup>9</sup>

The flexibility and potential of the method that we propose comes from the fact that we can analyze the MTF of each subsystem separately. This enables us to have control over the influence of each subsystem in the degradation of the final image. In addition, we can quantify the degree to which the subsystem degrades the final image.

The method proposed here thus constitutes a relatively simple and versatile technique and could be used to measure the MTF of contact lenses, although with the added difficulty of its small diameter.

## 2. Experimental Device

The experimental device (Fig. 1) comprises a He–Ne laser source ( $\lambda = 632.8$  nm; 17 mW), an integrating sphere ( $\phi = 152.4$  mm), an optical bench on which a

---

The authors are with the Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias (Edificio Mecenas), Universidad de Granada, Campus Fuentenueva s/n, E-18071 Granada, Spain. A. M. Pozo's e-mail address is ampmolin@ugr.es.

Received 12 April 2005; revised 28 July 2005; accepted 17 August 2005.

0003-6935/05/367744-05\$15.00/0

© 2005 Optical Society of America

linear polarizer is situated together with a double-slit aperture, the lens, which is the object of the study, and the CCD camera, connected to its control card installed in a personal computer. The laser radiation is aimed at the input aperture of the integrating sphere, generating the speckle pattern at the output aperture. These conditions ensure that the power spectral density (PSD) of the speckle irradiance in the CCD is proportional to the autocorrelation of the pupil function plus a delta function of zero frequency.<sup>10,11</sup> The relationship between the PSDs is given by

$$\text{PSD}_{\text{output}}(\xi, \eta) = [\text{MTF}(\xi, \eta)]^2 \text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta), \quad (2)$$

where  $\xi$  and  $\eta$  are the spatial frequencies corresponding to the horizontal and the vertical directions  $x$  and  $y$ , respectively. When the theoretical  $\text{PSD}_{\text{input}}$  is known for the double slit and the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  is measured by the CCD, it is possible to determine the MTF of the device by Eq. (2).

The measurements are performed with a rectangular double-slit aperture positioned at the output port of the integrating sphere. Given the geometry of this aperture, the  $\text{PSD}_{\text{input}}$  can be separated into the frequencies  $\xi$  and  $\eta$ . In this work, we consider the  $\text{PSD}_{\text{input}}(\xi)$  and therefore have determined the horizontal MTF. Each of the rectangular apertures of the double-slit aperture used is  $l_1 = 0.70$  mm wide and  $l_2 = 10$  mm tall, with a separation between centers of  $L = 7.3$  mm.<sup>12</sup>

When we consider the ensemble in Fig. 1, taking into account that the aperture is a double slit, the PSD is given by

$$\text{PSD}_{\text{input}}(\xi, \eta) = \langle I \rangle^2 \begin{bmatrix} \delta(\xi, \eta) + \frac{1(\lambda z)^2}{2 l_1 l_2} \text{tri} \left[ \frac{\lambda z}{l_1} \xi \right] \text{tri} \left[ \frac{\lambda z}{l_2} \eta \right] \\ + \frac{1(\lambda z)^2}{4 l_1 l_2} \text{tri} \left[ \frac{\xi - L/(\lambda z)}{l_1/(\lambda z)} \right] \text{tri} \left[ \frac{\lambda z}{l_2} \eta \right] \\ + \frac{1(\lambda z)^2}{4 l_1 l_2} \text{tri} \left[ \frac{\xi + L/(\lambda z)}{l_1/(\lambda z)} \right] \text{tri} \left[ \frac{\lambda z}{l_2} \eta \right] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where  $\text{tri}(X) = 1 - |X|$  for  $|X| \leq 1$  and zero elsewhere,  $\langle I \rangle^2$  is the square of the average speckle irradiance, and  $z$  is the distance between the observation plane and the exit pupil of the system. In this way, the double-slit aperture determines the content in spatial frequency of the speckle pattern registered on the CCD.<sup>13</sup>

For the measurements, a high-resolution CCD monochrome PixelFly array was used, which comprised a matrix of  $1360 \times 1024$  pixels (horizontal  $\times$  vertical) as well as horizontal and vertical spacing between pixels  $\Delta x$  of  $4.65 \mu\text{m}$ . The Nyquist spatial frequency for a CCD with a spacing between pixels  $\Delta x$  is given by  $\xi_{\text{Ny}} = 1/(2\Delta x)$ , providing a Nyquist frequency of  $107.5$  cycles/mm in both directions.

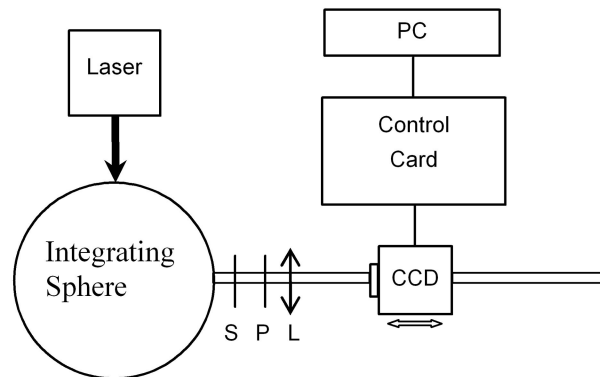


Fig. 1. Experimental device for the optical characterization of ophthalmic lenses. The double-slit aperture (S), a polarizer (P), and the lens (L) are situated at the output port of the integrating sphere. PC, personal computer.

For the imaging processing, the appropriate software was developed with version 6.1 of MATLAB.

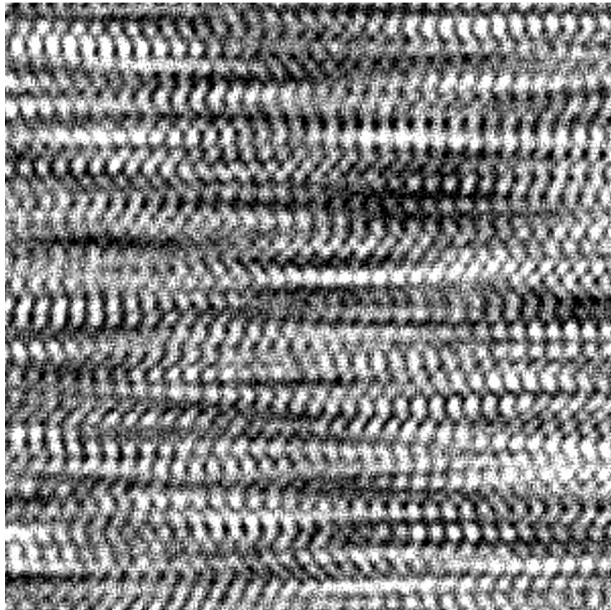
### 3. Data Processing

For the optical characterization of each of the lenses, the CCD was situated at 50 different positions with respect to the lens and, at each of these positions, ten frames were taken and averaged to reduce the temporal noise.<sup>14</sup> From the resulting frame, the dark frame was subtracted, and a region of  $600 \times 600$  pixels pixels was selected. A fast Fourier transform was performed on each row of the speckle data. The magnitude squared in one dimension provided a single estimate of the one-dimensional power spectrum,  $\text{PSD}_{\text{output}}(\xi)$ . These 600 spectra were averaged together for a better signal-to-noise ratio in the  $\text{PSD}_{\text{output}}(\xi)$ .<sup>14</sup> The frames were stored in tiff format without compression, at an integration time of 0.7 s. This process was followed for each position of the CCD.

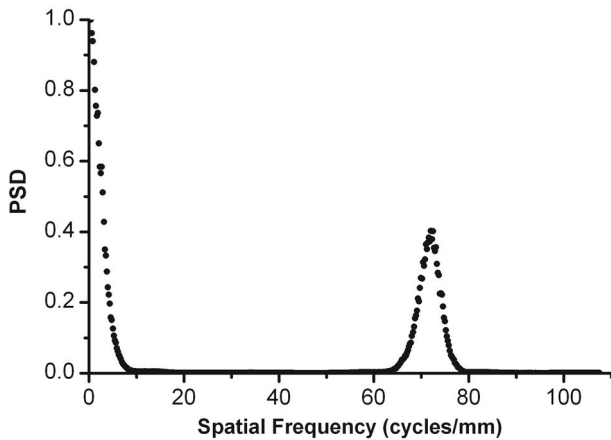
The double-slit aperture provides a peak at the  $\text{PSD}_{\text{output}}$  centered on a frequency that depends on the distance between the CCD and the lens. Thus the distance between the lens and the detector determines the spatial frequency being tested, and therefore high frequencies are tested close to the lens and low frequencies are tested far away from the lens. It suffices to measure the maximum value of this peak, after normalizing the PSD to the unit for frequency zero and taking the square root to establish the value of the MTF at the frequency that is being evaluated at that moment.

Figure 2 shows a section of speckle pattern captured by the CCD and an example of normalized  $\text{PSD}_{\text{output}}$  determined with a lens of +3D from manufacturer M1.

If the  $L$  lens were not used in Fig. 1, the distance  $z$  in Eq. (3) would be the distance between the double-slit aperture and the CCD. When a lens is placed between the double-slit aperture and the CCD,  $z$  is the distance between the exit pupil of the system and the CCD.<sup>10</sup> It is worth noting that it is not necessary to know  $z$  because the frequency that is being evalu-



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Speckle pattern with the double-slit aperture and (b) normalized PSD<sub>output</sub> with a lens of +3D of manufacturer M1.

ated at each point is revealed on performing the Fourier transform of the speckle pattern, as shown in Fig. 2(b).

#### 4. Results and Discussion

Figure 3 presents the MTF of the total system (lens + CCD) for the lenses of manufacturer M2. The experimental data were fit to a second-order polynomial, with correlation coefficients of 0.89, 0.81, 0.88, 0.93, and 0.91 for the 0D (zero-power lens), -5D, -3D, +3D, and +5D lenses, respectively.

The figure shows that the lenses with negative powers present higher MTF values than do the lenses with positive power. On the other hand, in the case of the negative lenses, the lens of -5D gave higher values than did the lens of -3D. For the positive lenses, the lens of +5D resulted in lower values than for the lens of +3D.

Figures 4 and 5 show a comparison of the lenses of

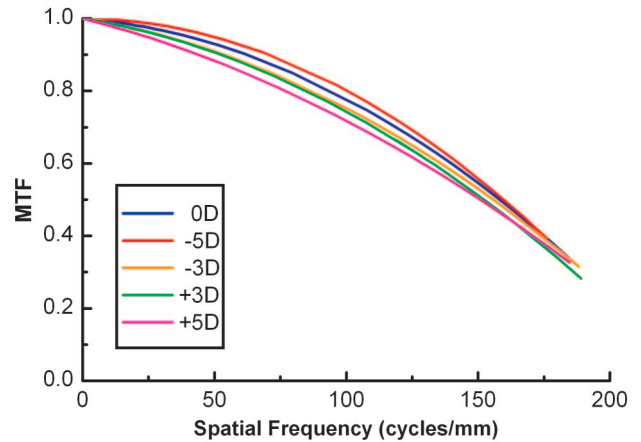


Fig. 3. (Color online) MTF of the total system for the lenses of manufacturer M2.

+3D and -3D for the two manufacturers. With the lenses of manufacturer M1, higher values were found than for those of manufacturer M2, indicating greater optical quality with respect to the MTF. The fit of the experimental data to second-order polynomials for the -3D and +3D lenses of manufacturer M1 was 0.92 and 0.90, respectively. We have represented the error bars corresponding to the standard deviation for manufacturer M1, calculated from 20 measurements for each position of the CCD. It bears noting that the error bars are greater for the low spatial frequencies. This is due to the weaker signal's reaching the CCD, because, as stated in Section 3, the low frequencies are tested far away from the lens and therefore from the laser source. The standard deviation decreases as the spatial frequency increases. In the case of the +3D lens (Fig. 4), from the frequency of 79.8 cycles/mm, the standard deviation is consistently less than the subtraction of the MTF values between the two manufacturers. Thus, for example, for 79.8 cycles/mm, the standard deviation is 0.015, and the subtraction of the values of the MTF between

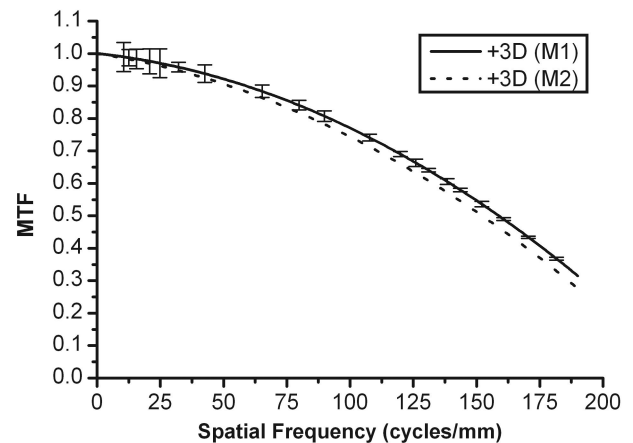


Fig. 4. MTF found with lens of +3D for the two manufacturers. The error bars represent the standard deviation in the case of the lens of manufacturer M1.

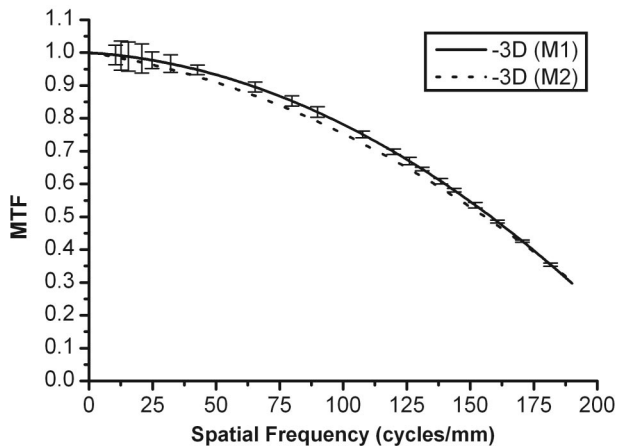


Fig. 5. MTF found with lens of  $-3D$  for the two manufacturers. The error bars represent the standard deviation in the case of the lens of manufacturer M1.

the two manufacturers is 0.02. For 181.7 cycles/mm, the subtraction between the MTFs of manufacturers M1 and M2 is 0.04 and the standard deviation is 0.005. In the case of the  $-3D$  lens (Fig. 5), from the frequency of 42.6 cycles/mm, the standard deviation is invariably lower than the subtraction of the values between the two manufacturers. For 42.6 cycles/mm, the subtraction of the MTF values between the two manufacturers is 0.02 and the standard deviation is 0.015. For 107.7 cycles/mm, the subtraction between the MTFs is 0.03 and the standard deviation is 0.010.

Figure 6 shows, on the ordinate axis, the quotient of the MTF curves for the lenses of  $+3D$  and  $-3D$  of manufacturers M1 and M2. This type of representation offers an important advantage; that is, on making the quotient between the two curves, we succeed in canceling the modulation effect in spatial frequency that the CCD itself introduces. For the  $+3D$  lens, the MTF of the lens of manufacturer M1 is consistently higher than that of manufacturer M2. For the  $-3D$  lens, the MTF in the case of manufacturer M1 is greater than that of manufacturer M2,

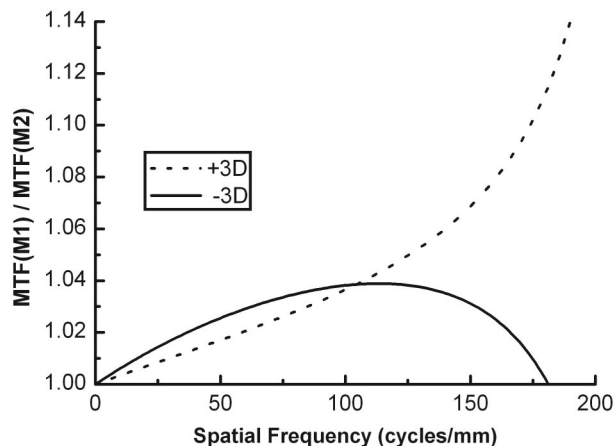


Fig. 6. Quotient of the MTF curves for the lenses of  $+3D$  and  $-3D$  of the manufacturers M1 and M2.

but, as opposed to the lens of  $+3D$ , it begins later to diminish from the Nyquist frequency (107.5 cycles/mm) onwards.

An important advantage of the double-slit method is that the greatest spatial frequency that can be measured is approximately twice the Nyquist frequency of the CCD. The main disadvantage of this method is the necessity of moving the CCD in order to measure within a broad range of spatial frequencies.<sup>12</sup> This disadvantage can be avoided if a single aperture is used, but in this case the MTF measurements are limited to spatial frequencies somewhat below the Nyquist frequency. However, with a single aperture, it would be possible to determine the MTF of the lens in one measurement.

## 5. Conclusions

In this work, we have performed an optical characterization of ophthalmic lenses by the laser speckle pattern generated with an integrating sphere. The MTF was determined for lenses of positive and negative powers. Also, the results were compared with those of lenses made by two different manufacturers.

With these results, we conclude that the double-slit method offers a versatile technique for comparing the optical quality of ophthalmic lenses from different makers.

We thank the Spanish Ministerio de Ciencia y Tecnología for financing project DPI2001-1174-C02-02.

## References

1. J. C. Feltz and M. A. Karim, "Modulation transfer function of charge-coupled devices," *Appl. Opt.* **29**, 717–722 (1990).
2. S. K. Park, R. Schowengerdt, and M. Kaczynski, "Modulation-transfer-function analysis for sampled image system," *Appl. Opt.* **23**, 2572–2582 (1984).
3. E. Levy, D. Peles, M. Opher-Lipson, and S. G. Lipson, "Modulation transfer function of a lens measured with a random target method," *Appl. Opt.* **38**, 679–683 (1999).
4. A. Daniels, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and E. Sapir, "Random transparency targets for modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions," *Opt. Eng.* **34**, 860–868 (1995).
5. G. D. Boreman, Y. Sun, and A. B. James, "Generation of laser speckle with an integrating sphere," *Opt. Eng.* **29**, 339–342 (1990).
6. G. Boreman and E. L. Dereniak, "Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle," *Opt. Eng.* **25**, 148–150 (1986).
7. P. J. Valle, J. E. Oti, V. F. Canales, and M. P. Cagigal, "Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses," *Opt. Exp.* **13**, 2782–2792 (2005).
8. P. A. Piers, N. E. S. Norrby, and U. Mester, "Eye models for the prediction of contrast vision in patients with new intraocular lens designs," *Opt. Lett.* **29**, 733–735 (2004).
9. P. M. Prieto, F. Vargas-Martin, S. Goelz, and P. Artal, "Analysis of the performance of the Hartmann–Shack sensor in the human eye," *J. Opt. Soc. Am. A* **17**, 1388–1398 (2000).
10. J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, Vol. 9 of Topics in Applied Physics, J. C. Dainty, ed. (Springer-Verlag, 1984), pp. 35–40.

11. L. I. Goldfischer, "Autocorrelation function and power spectral density of laser-produced speckle patterns," *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 247–253 (1965).
12. A. M. Pozo and M. Rubiño, "Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer functions of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle," *Appl. Opt.* **44**, 1543–1547 (2005).
13. M. Sensiper, G. D. Boreman, A. D. Ducharme, and D. R. Snyder, "Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle," *Opt. Eng.* **32**, 395–400 (1993).
14. G. D. Boreman, "Fourier spectrum techniques for characterization of spatial noise in imaging arrays," *Opt. Eng.* **26**, 985–991 (1987).





## **ANEXO II**



# Influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de videocámaras CCD mediante el método *speckle*

A. M. Pozo, A. Fernández-Oliveras and M. Rubiño

<sup>1</sup>Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada 18071, Spain  
[ampmolin@ugr.es](mailto:ampmolin@ugr.es), [alilia@ugr.es](mailto:alilia@ugr.es), [mrlopez@ugr.es](mailto:mrlopez@ugr.es)

**Abstract:** En este trabajo analizamos la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la función de transferencia de modulación (MTF) de una videocámara CCD mediante el método *speckle*. Hemos realizado el estudio con dos tarjetas diferentes. Hasta 20 ciclos/mm el comportamiento de ambas tarjetas es similar; en cambio, a partir de dicha frecuencia espacial, la MTF de una de las tarjetas es superior a la de la otra. Además, una de ellas presenta una respuesta espacial prácticamente nula en el entorno de 40 ciclos/mm. Las frecuencias *boost* obtenidas para cada tarjeta han sido 25 ciclos/mm y 37 ciclos/mm.

©2008 Optical Society of America

**OCIS codes:** (040.1520) CCD, charge-coupled device; (040.7290) Video; (110.4100) Modulation transfer function; (110.6150) Speckle imaging

---

## References and links

1. G. C. Holst and T. S. Lomheim, *CMOS/CCD sensors and camera systems* (SPIE Press, Bellingham, Washington, 2007), Chap. 9.
2. B. T. Teipen and D. L. MacFarlane, "Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurements of charge-coupled-device video camera systems," *Appl. Opt.* **39**, 515-525 (2000).
3. S. Johansson, Y. A. Lebedinsky, and K. G. Predko, "Experimental MTF Measurements of CCD Using an Interferometrically Generated Test Pattern," *Journal of Imaging Science* **35**, 320-325 (1991).
4. J. C. Feltz and M. A. Karim, "Modulation transfer function of charge-coupled devices," *Appl. Opt.* **29**, 717-722 (1990).
5. S. K. Park, R. Schowengerdt, and M. A. Kaczynski, "Modulation-transfer-function analysis for sampled image system," *Appl. Opt.* **23**, 2572-2582 (1984).
6. G. D. Boreman and E. L. Dereniak, "Method for measuring modulation transfer function of charge-coupled devices using laser speckle," *Opt. Eng.* **25**, 148-150 (1986).
7. G. D. Boreman, Y. Sun, and A. B. James, "Generation of laser speckle with an integrating sphere," *Opt. Eng.* **29**, 339-342 (1990).
8. A. M. Pozo and M. Rubiño, "Comparative analysis of techniques for measuring the modulation transfer functions of charge-coupled devices based on the generation of laser speckle," *Appl. Opt.* **44**, 1543-1547 (2005).
9. A. M. Pozo, A. Ferrero, M. Rubiño, J. Campos, and A. Pons, "Improvements for determining the modulation transfer function of charge-coupled devices by the speckle method," *Opt. Express* **14**, 5928-5936 (2006).

---

## 1. Introducción

Actualmente las videocámaras, tanto analógicas como digitales, se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, como sistemas de videovigilancia, videocámaras digitales de uso doméstico, visión artificial, monitorización de entornos, etc. Una videocámara es un sistema optoelectrónico que puede considerarse constituido por tres subsistemas: el objetivo, el

detector y la tarjeta capturadora de vídeo. La degradación de la calidad de las imágenes capturadas por la videocámara (debidas por ejemplo al objetivo utilizado) puede ser parcialmente compensada mediante filtros electrónicos *boost*. Un filtro *boost* aumenta la respuesta de la videocámara en un rango determinado de frecuencias espaciales [1-3]. La tarjeta capturadora de vídeo es, por tanto, un elemento esencial de la videocámara; sin embargo, apenas ha sido investigada su influencia en la calidad óptica de la imagen proporcionada por el sistema.

La función de transferencia de modulación (MTF) permite caracterizar la respuesta en frecuencia espacial de un sistema optoelectrónico y evaluar la calidad óptica del mismo [4, 5]. En este trabajo hemos analizado la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de una videocámara CCD analógica. Para ello, hemos determinado experimentalmente la MTF mediante el método *speckle* con rendija simple [6-8], utilizando dos tarjetas diferentes. El método permite, además, obtener la frecuencia *boost* de las tarjetas de vídeo y la frecuencia espacial máxima que el sistema puede resolver, lo cual es de gran importancia para seleccionar la tarjeta de vídeo apropiada en función de la aplicación que vaya a tener la videocámara. Una ventaja interesante de este método es que no es necesario un sistema óptico para proyectar el patrón sobre la matriz de píxeles de la videocámara; de esta manera, la MTF medida es debida solamente a la contribución de la tarjeta capturadora y el detector, y se evita así la posible influencia que puede tener el objetivo de la videocámara en la medida de la MTF. Con este trabajo se ha demostrado, además, la viabilidad del método *speckle* con rendija simple para analizar la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en videocámaras CCD.

## 2. Fundamento teórico

La MTF del CCD puede obtenerse a partir de las densidades espectrales de potencia (PSD) del patrón *speckle* mediante la expresión [6]:

$$PSD_{salida}(\xi, \eta) = [MTF(\xi, \eta)]^2 PSD_{entrada}(\xi, \eta), \quad (1)$$

donde  $\xi, \eta$  son las frecuencias espaciales correspondientes a las direcciones horizontal y vertical, respectivamente;  $PSD_{salida}$  es la PSD determinada experimentalmente del patrón *speckle* capturado con la videocámara CCD, y es proporcional al módulo al cuadrado de la transformada de Fourier del patrón *speckle*;  $PSD_{entrada}$  es la PSD teórica conocida para una rendija simple, y viene dada por:

$$PSD_{entrada}(\xi, \eta) = \langle I \rangle^2 \left[ \delta(\xi, \eta) + \frac{(\lambda z)^2}{l_1 l_2} tri\left(\frac{\lambda z}{l_1} \xi\right) tri\left(\frac{\lambda z}{l_2} \eta\right) \right], \quad (2)$$

donde  $tri(X) = 1 - |X|$  para  $|X| \leq 1$  y cero en cualquier otro caso,  $\langle I \rangle^2$  es el cuadrado de la irradiancia media del patrón *speckle*,  $\delta(\xi, \eta)$  es la función delta,  $l_1$  and  $l_2$  son, respectivamente, las dimensiones horizontal y vertical de la rendija simple,  $\lambda$  es la longitud de onda del láser, y  $z$  es la distancia entre la rendija y el detector CCD.

## 3. Dispositivo experimental

La figura 1 muestra el dispositivo experimental utilizado, compuesto por un láser He-Ne ( $\lambda=632.8$  nm; 17 mW), una esfera integradora, un polarizador lineal y, finalmente, la videocámara conectada a un PC portátil mediante la tarjeta capturadora de vídeo. Como abertura utilizamos un rendija simple de 3mm de ancho y 6mm de alto. Para el procesamiento de las imágenes se desarrolló el software necesario mediante MATLAB.

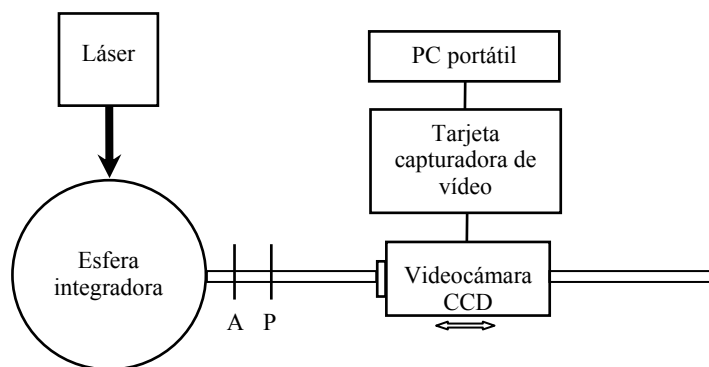


Fig. 1. Dispositivo experimental para la medida de la MTF de la videocámara CCD. A, es una rendija simple y P un polarizador.

La videocámara CCD utilizada fue una Center HICB347H monocroma, con una distancia de separación entre centros de píxeles contiguos,  $\Delta x$ , de  $7,98 \mu\text{m}$ . La frecuencia de Nyquist del detector CCD,  $\xi_{Ny}$ , viene dada por  $\xi_{Ny} = 1/(2\Delta x)$ ,  $62,67$  ciclos/mm, en nuestro caso.

Algunas de sus características son las siguientes:

Formato del sensor: 1/3" CCD

Tamaño del chip: 6.0 mm (H) x 4.96 mm (V)

Número de píxeles: Estándar, 500 (H) x 582 (V) / Alta, 752 (H) x 582(V)

Resolución: Estándar, 380 líneas TV / Alta, 570 líneas TV

Salida de vídeo: conector BNC.

En las medidas utilizamos dos tarjetas de vídeo diferentes: una tarjeta Pinnacle MovieBox DV (tarjeta #1) y una tarjeta Imperx Incorporated VCE-B5A01 (tarjeta #2). Para las medidas con la tarjeta #1, la videocámara se conectó a la tarjeta mediante un cable BNC-RCA y la tarjeta se conectó a un ordenador portátil a través de un puerto FireWire / IEEE-1394. En el caso de la tarjeta #2, la videocámara se conectó a la tarjeta mediante un cable BNC-RCA y la tarjeta se conectó al ordenador portátil a través de un puerto PCMCIA. Con ambas tarjetas se grabó una secuencia de vídeo de 1 s de duración del patrón *speckle* en formato AVI, a 25 frames/s. Finalmente, la MTF se obtuvo a partir de un *frame* extraído de la secuencia de vídeo.

#### 4. Resultados y discusión

En la figura 2 se muestra la MTF horizontal de la videocámara utilizando las dos tarjetas. Con la tarjeta #1 se obtienen valores superiores de MTF, indicando una mayor calidad óptica del conjunto constituido por la tarjeta de vídeo #1 y la videocámara. En el rango de frecuencias espaciales bajas (hasta 20 ciclos/mm), el comportamiento de ambas tarjetas es similar. A partir de dicha frecuencia espacial, se obtienen mayores valores de MTF con la tarjeta #1. Se puede observar, además, que la tarjeta #2 presenta una respuesta prácticamente nula en el entorno de 40 ciclos/mm. Este hecho es importante, pues si se utilizara la tarjeta #2 para una aplicación concreta, el sistema no permitiría resolver detalles de una escena con frecuencias espaciales en el entorno de 40 ciclos/mm.

Otro aspecto interesante que se aprecia en la figura 2 es que la frecuencia *boost* es diferente para ambas tarjetas: 37 ciclos/mm y 25 ciclos/mm para las tarjetas #1 y #2, respectivamente. Se pueden observar también los elevados valores de MTF obtenidos a bajas frecuencias espaciales, debidos a la no-uniformidad del campo producido por la rendija simple y a la no-uniformidad de respuesta espacial del detector [9]. Los valores elevados en ambas curvas a partir de 55 ciclos/mm son debidos a que en el entorno de la frecuencia de Nyquist, la

$PSD_{entrada}$  se aproxima a cero, mientras que la  $PSD_{salida}$  tiene aún un valor finito debido al propio ruido del CCD [8].

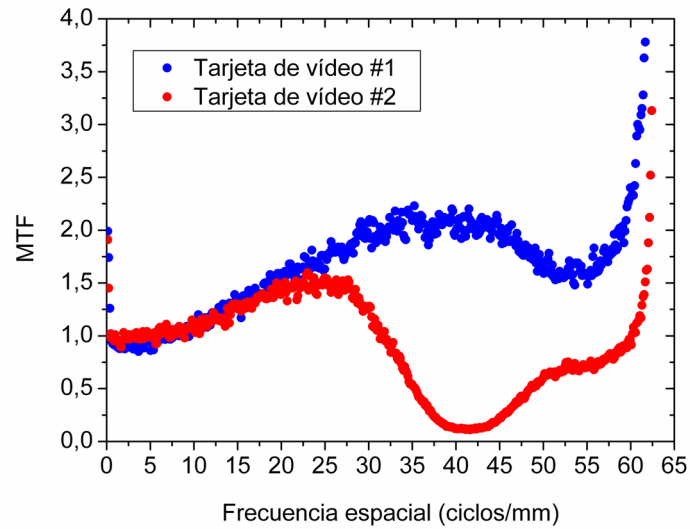


Fig. 2. MTF de la videocámara CCD utilizando dos tarjetas capturadoras de vídeo diferentes: tarjeta #1(MovieBox DV) y tarjeta #2 (VCE-B5A01).

En la figura 3 se compara la MTF de la videocámara con la MTF obtenida para una cámara de uso científico [8] con su correspondiente tarjeta digitalizadora. Como se puede observar en el caso de la cámara de uso científico, el rango de frecuencias espaciales es mayor y no presenta *boost*.

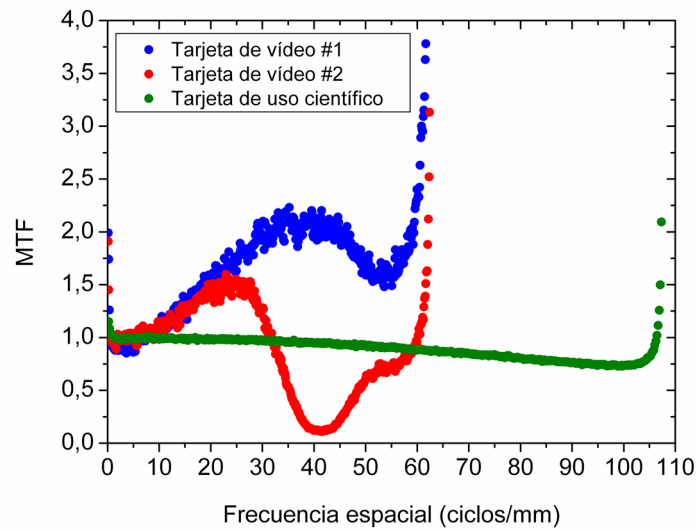


Fig. 3. Comparación entre las MTF de la videocámara con las tarjetas capturadoras #1 y #2 y la MTF de una cámara CCD de uso científico con su correspondiente tarjeta digitalizadora.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo hemos demostrado experimentalmente la viabilidad del método *speckle* con rendija simple para analizar la influencia de la tarjeta capturadora de vídeo en la MTF de una videocámara CCD analógica. Para ello, se ha medido la MTF de la videocámara utilizando dos tarjetas de vídeo diferentes. Los resultados han mostrado que la respuesta en frecuencia espacial es similar en ambas tarjetas hasta aproximadamente 20 ciclos/mm. A partir de dicha frecuencia, la MTF de la primera tarjeta es superior a la de la segunda, y presenta una buena respuesta hasta una frecuencia espacial próxima a la frecuencia de Nyquist del detector de la videocámara. En cambio, la segunda tarjeta presenta una respuesta prácticamente nula en el entorno de 40 ciclos/mm. Este método permite, además, obtener la frecuencia *boost* y la frecuencia máxima que el sistema puede resolver, dependiendo de la tarjeta de vídeo que se utilice. El método proporciona información importante para seleccionar la tarjeta de vídeo apropiada en función de la aplicación que vaya a tener la videocámara. Una ventaja interesante de este método es que no es necesario un sistema óptico para proyectar el patrón sobre la matriz de píxeles de la videocámara; de esta manera, la MTF medida es debida solamente a la contribución de la tarjeta capturadora y el detector, y se evita así la posible influencia que puede tener el objetivo de la videocámara en la medida de la MTF del conjunto constituido por la tarjeta capturadora y el detector de la videocámara.

## **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia por la financiación del proyecto FIS2007-66671-C02-02.



