

Dispositivo para la medida de frentes de onda muy aberrados y con gran apertura.

Jesús Caum¹, Josep Arasa^{1*} y Santiago Royo¹

¹*Centre de Desenvolupament de Sensors Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya (CD6-UPC) Rambla Sant Nebridi 10, 08222 Terrassa*

<http://www.cd6.upc.es>

1. Introducción

La presencia de frentes de onda muy aberrados es inherente a uno de los elementos ópticos de uso más extendido en la óptica oftálmica, las lentes de adición progresiva. En ellas, las grandes aberraciones ópticas existentes se distribuyen en todo el diámetro de la lente (65mm). Aunque en el mercado existen diferentes dispositivos destinados a la medida de frentes de onda muy aberrados, pocos dan solución a la combinación de gran amplitud de las aberraciones y gran apertura de medida. Ello nos ha hecho plantear nuevas estrategias para implementar una aplicación para el control de calidad industrial de las lentes progresivas, superando la limitación de la apertura de medida pero manteniendo los valores de montajes para aperturas menores en cuanto al rango dinámico y precisión de la medida realizada. A consecuencia de la aplicación planteada, se desea realizar la medida de la apertura correspondiente al frente de onda de la lente completa con una única exposición (se tratará de un dispositivo *single-shot*), lo que hace necesario plantear un nuevo dispositivo experimental.

En el presente trabajo presentamos un montaje que, basándose en la técnica de deflectometría Ronchi digital [1] [2], es capaz de medir frentes de onda con cambios de potencia superiores a 3 dioptrías en recorridos de 20 mm, lo que equivale a una variación de 20 longitudes de onda por milímetro. Para ello, se realiza una segmentación del plano de registro de pendientes mediante un conjunto de 6 cámaras CCD sincronizadas. Aplicando técnicas de filtrado digital de la señal se consigue una suavización uniforme de los registros de los ronchigramas, lo que permite aplicar con éxito la técnica de desplazamiento de fase, y, por tanto, disponer de una elevada densidad de muestreo del frente de onda tanto en el caso de realizar un análisis global o bien sólo un análisis local de determinadas zonas de interés, manteniendo en todos los casos alta resolución de medida en toda la apertura.

2. Descripción

Se ha fijado un máximo de 65mm de apertura en el sistema, lo que hace preciso mantener una gran apertura del sistema óptico empleado en la medida de las pendientes. Para mantener una resolución elevada, es necesario emplear distancias focales largas en el sistema de medida de pendientes. Como consecuencia, las dimensiones del ronchigrama resultante son muy superiores a las de los un sensor CCD estándar.

En la Fig.1 se observan los distintos elementos constituyentes del montaje experimental que se ha diseñado y construido. Puede observarse como el dispositivo consiste, inicialmente, en un sistema de colimación formado por un diodo láser conectado a fibra colocado en el foco objeto de un doblete acromático de 486.3mm de focal que hace incidir un frente de onda plano sobre la lente problema. El frente de onda modificado por la lente atraviesa una red de Ronchi de período 2mm, y a continuación incide sobre el sistema de medida de pendientes. Este sistema se compone de una lente de un segundo doblete de focal 486.3mm, en cuyo plano focal imagen se sitúa una pantalla difusora, sobre la que se proyecta el ronchigrama. Una colección de seis cámaras CCD con sus correspondientes objetivos registra áreas contiguas de la pantalla difusora, descomponiendo en seis regiones el ronchigrama completo. El montaje experimental se caracteriza porque todos los haces del frente de onda que presenten igual pendiente sobre la lente llegarán a la pantalla en el mismo punto, por lo que el registro capturado por las cámaras es un registro de las pendientes de los haces que constituyen el frente de onda a medir. Una vez fijados los valores de la distancia focal de la lente de medida y el tamaño del píxel del registro obtenido,

la Ec. (1), permite determinar las pendientes del vector unitario (u,v,w) asociados a cada uno de los píxeles del registro correspondientes a las posiciones (n,m) referidas al centro del ronchigrama (considerado punto de pendiente cero).

$$(u, v, w) = \left(n \frac{\Delta x}{f'}, m \frac{\Delta y}{f'}, \sqrt{1 - n^2 \frac{\Delta x^2}{f'^2} - m^2 \frac{\Delta y^2}{f'^2}} \right) \quad (1)$$

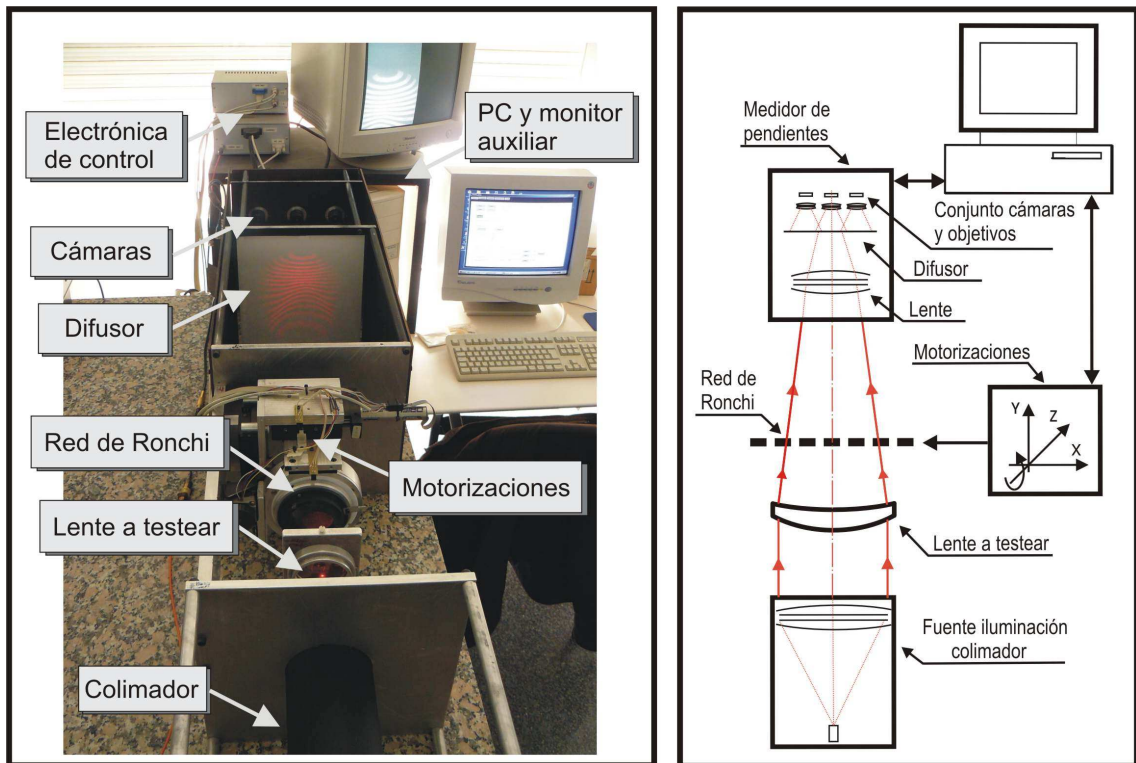


Figura 1: Montaje experimental.

Las dimensiones del difusor utilizado, que coinciden con las del ronchigrama obtenido, son de 220x220mm. El conjunto de cámaras utilizado permite capturar ronchigramas que una vez digitalizados y combinados se convierten en imágenes de 1200x1170 píxeles, con una resolución en pendientes de $3.7 \cdot 10^{-4}$ radianes y una apertura útil final del sistema óptico de 63.5 mm.

Dado que la técnica de medida se basa en la deflectometría Ronchi, en la que el principio de medida es la proyección de las sombras de una red periódica, es necesario evitar efectos cooperativos entre los órdenes de difracción que pueden aparecer al atravesar la red de Ronchi. Para ello, es necesario utilizar una frecuencia espacial muy baja para la red de Ronchi (períodos de 2mm), lo que conlleva una reducción de la resolución en el muestreo del frente de onda. Este problema se ha evitado aplicando técnicas de desplazamiento de fase [3] [4]. Con el uso de estas técnicas se han alcanzado resoluciones espaciales experimentales del orden de $40 \mu\text{m}$ en todo el diámetro de medida.

En la aplicación de las técnicas de desplazamiento de fase una de las principales fuentes de error es el ruido presente en la señal del ronchigrama una vez registrada, y que separa el patrón de franjas de la señal sinusoidal necesaria para la aplicación de los algoritmos de cálculo de fase. Este ruido tiene distintas procedencias, como, en el caso que nos ocupa, el propio difusor, la transmitancia rectangular del test, la difracción en los bordes de las franjas, o el propio sistema de registro, que incluye la cámara y la tarjeta digitalizadora [5].

Con el fin de minimizar el efecto del ruido en los registros se han empleado filtros digitales adaptados [6], con un algoritmo de sintonía dependiente de las características locales de los propios registros de pendientes [7], siendo preciso realizar una cuidadosa elección del tipo y estructura del filtro empleado. Los registros obtenidos, una vez aplicada la técnica de desplazamiento de fase, permiten obtener un mallado de alta densidad de registros interpolados que, a través de su integración numérica, nos proporcionan un frente de onda completo en el plano de la red de Ronchi.

3. Resultados

El correcto funcionamiento tanto del montaje experimental como de los algoritmos implementados se ha comprobado con una serie de lentes oftálmicas de potencias esféricas comprendidas entre +3.0 y +5.0D. Para todas ellas, se procedió al registro y reconstrucción de los frentes de onda esféricos y se ha verificado que las topografías tienen la forma y curvatura esperadas. A partir de esta validación experimental, se han obtenido con éxito resultados para lentes oftálmicas de adición progresiva.

En la Figura 2 se presentan las distribuciones bidimensionales de fase que, en este caso, equivalen a distribuciones de pendientes en las direcciones X e Y, una vez se ha aplicado la técnica del desplazamiento de fase, para el caso de una lente esférica de 4.0D (fig.2a), y para el caso de una lente progresiva OI +4.0 Ad 2.0.

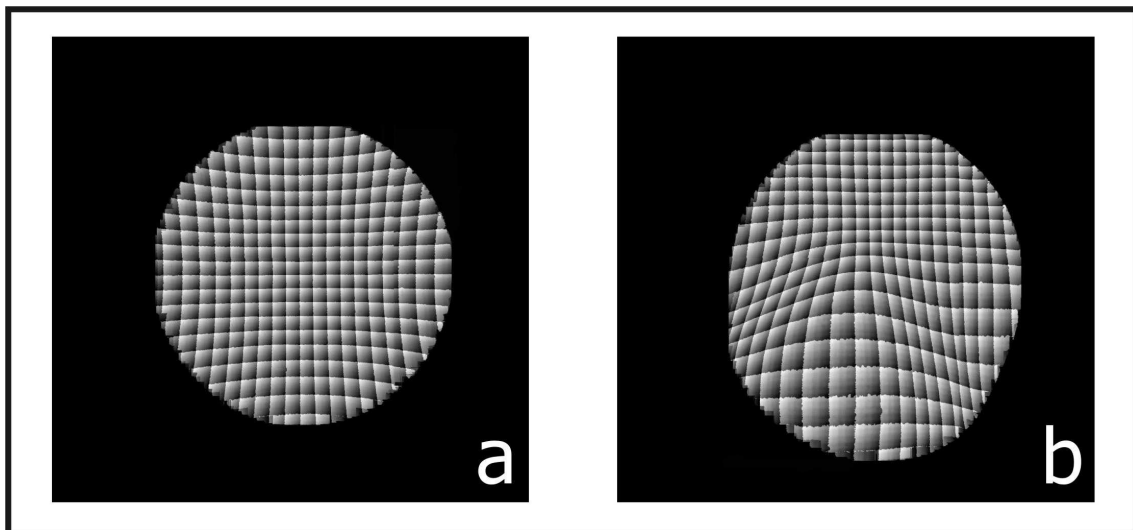


Figura 2: Distribuciones de pendientes. a) lente esférica +4.0D, b) lente progresiva OI +4.0 Ad 2.

Finalmente, en la Figura 3 se representan las posiciones de los puntos obtenidos del frente de onda sobre el plano XY con la información de la coordenada z codificada en falso color, para las mismas lentes de la figura anterior. De las figuras es posible apreciar la elevada densidad de muestreo espacial obtenida sobre la totalidad del frente de onda, reflejada por el número de puntos considerados, que para el caso de la lente esférica alcanza los $2.93 \cdot 10^5$ puntos de muestreo, mientras que en el caso de la lente progresiva este valor alcanza los $1.28 \cdot 10^5$ puntos de muestreo.

4. Conclusiones

Se ha presentado un montaje experimental *single-shot* capaz de obtener topografías de frentes de onda muy aberrados y con grandes aperturas, con elevada resolución vertical (0.4mrad) y horizontal (40 μ m). La elevada densidad de muestreo del frente de onda permite obtener datos fiables bien en áreas específicas del frente de onda o bien en toda su apertura, por lo que la estrategia de este montaje es potencialmente de gran utilidad en las etapas de diseño y de fabricación de lentes oftálmicas de adición progresiva.

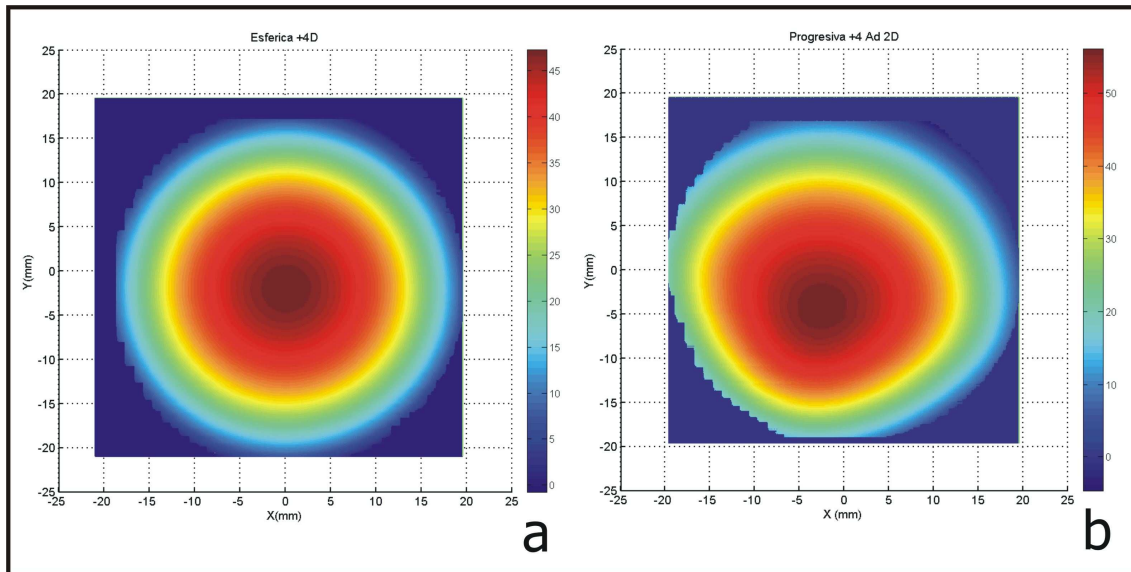


Figura 3: Topografía del frente de onda. a) lente esférica +4.0D, b) lente progresiva OI+4.0 Ad 2.

Bibliografía

- [1] A. Cornejo Rodriguez, “Ronchi Test”, *Optical Shop testing*, 3ªEd. Daniel Malacara (Wiley & Sons Inc. New York 2007).
- [2] S.Royo, J.Arasa, C.Pizarro “Profilometry of toroidal surfaces with an improved Ronchi test” *Appl. Opt.* v39 pp 5721-5731 (2000).
- [3] K. Creath, J. Schmit, “N-point spatial phase measurement techniques for non destructive testing”, *Optics and Lasers in Engineering* n° 24, pp. 365-379 Ed. Elsevier Science Limited (1996).
- [4] Y. Surrel, “Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping” *Appl.Opt.*, Vol. 35 n° 1, pp 51-60 (1996).
- [5] O. A. Skydan, F. Lilley, M.J. Lalor, D. R. Burton. “Quantization error of CCD cameras and their influence on phase calculation in fringe pattern analysis”, *Appl.Opt.* Vol.42 n° 26, pp. 5302-5307 (2003).
- [6] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. “Tratamiento de señales en tiempo discreto”, 2ª Ed. (Prentice Hall Iberia 2000).
- [7] J. Caum, J. Arasa, S. Royo, M. Ares. “Application of matched digital filters to noisy fringe-patterns from complex wavefronts” . *Proc. SPIE* vol.5856, pp. 227-237 (2005).