

WAVEFRONT TESTER: Un nuevo laboratorio virtual para el estudio de los sensores frente de onda

WAVEFRONT TESTER: A new virtual laboratory for wavefront sensors teaching

Vicente Ferrando, Walter D. Furlan

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

viferma1@upv.es, walter.furlan@uv.es

Laura Remón, Fernando Giménez, Juan A. Monsoriu

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

lauremar@upvnet.upv.es, fgimenez@mat.upv.es, jmonsori@fis.upv.es

Abstract

Se presenta un laboratorio virtual desarrollado en MATLAB[®] GUI (Graphical User Interface) para ser utilizado en la asignatura de “Tecnología de Sensores Optoelectrónicos” que se imparte en “Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño” de la Universitat Politècnica de València. El objetivo de este laboratorio es servir de herramienta informática para el estudio de un sensor Shack Hartman y los parámetros que determinan el rango dinámico del mismo en la medida de las aberraciones. Se presentan distintos ejemplos realizados con diferentes aberraciones (desenfoque, astigmatismo, coma) y para diferentes configuraciones del sensor

We present a new virtual laboratory developed with MATLAB[®] GUI (Graphical User Interface) used to teach different aberration effects in the “Tecnología de Sensores Optoelectrónicos” at “Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño” of the Universitat Politècnica de València. The objective of this lab is to provide a computer tool to study the working principle of a Shack Hartman sensor and the parameters that determine the dynamic range of the same. Some examples made with different aberrations (defocus, astigmatism, coma) and for different sensor configurations are presented.

Keywords: aberrations, wavefront sensors, MATLAB[®]

Palabras clave: aberraciones, sensores de frente de onda, MATLAB[®]

1 Introducción

Los sensores de frente de onda, también conocidos como aberrómetros, son instrumentos comúnmente utilizados en Óptica y Física en general. Estos sensores proporcionan información cuantitativa sobre las aberraciones ópticas de un sistema óptico cualquiera (fuente de luz como un láser, un objetivo, ...) y, por lo tanto, informan sobre la calidad óptica. Estos instrumentos se utilizan, por ejemplo, en Óptica Adaptativa para mejorar las imágenes tomadas con los telescopios astronómicos modernos, reduciendo el efecto introducido por la atmósfera en el frente de onda (Marino, 2014).

Se han desarrollado diferentes tipos de sensores de frente de onda (Feng, 2014; Mico, 2012; Paurisse, 2010). Sin embargo, el sensor Shack-Hartmann (SH) es el dispositivo más utilizado en la actualidad para la medida del frente de onda (Idir, 2014). Su principio es relativamente sencillo y bien conocido (Platt, 2001). Consiste básicamente en una matriz de microlentes (MML) de la misma distancia focal ubicadas delante de una cámara CCD. Cada microlente muestrea el frente de onda que le llega y, calculando el desplazamiento lateral de cada spot focal con respecto al frente de onda de referencia, permite obtener las aberraciones presentes en un sistema óptico cualquiera. Finalmente, para calcular el frente de onda se aplican algoritmos de reconstrucción. Entre los algoritmos más utilizados se basan en la descomposición del frente de onda en polinomios de Zernike (Li, 2014).

En este trabajo se presenta un nuevo laboratorio virtual desarrollado en MATLAB[®] GUI (Graphical User Interface) para ser utilizado en la asignatura de “Tecnología de Sensores Optoelectrónicos” del “Máster Universitario en Sensores para Aplicaciones Industriales” que se imparte en “Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño” de la Universitat Politècnica de València. El objetivo de este laboratorio es servir de herramienta informática de apoyo para ilustrar el funcionamiento de un sensor SH y los parámetros que determinan el rango dinámico del mismo en la medida de las aberraciones. Se presentan algunos ejemplos realizados con diferentes aberraciones (desenfoque, astigmatismo, coma) para diferentes configuraciones de la MML.

2 Teoría Básica

En la Figura 1 se muestra el principio de funcionamiento de un SH. Éste consiste básicamente en una MML de igual distancia focal colocada delante de una cámara CCD. La función principal de la MML es muestrear el frente de onda que le llega. Si el frente de onda es plano, sin aberraciones (puntos verdes en la Figura 1), sobre la CCD se forma una matriz regular de puntos determinada por la geometría de la propia MML. Si el frente de onda que llega a la MML está aberrado, onda problema (puntos rojos en la Figura 1), sobre la CCD se forma una serie de puntos desplazados respecto a los generados por la onda plana. Ese desplazamiento viene dada por (Platt, 2014):

$$\frac{\partial W(\bar{x}, \bar{y})}{\partial x} = \frac{\Delta x(\bar{x}, \bar{y})}{f_{MML}}$$

$$\frac{\partial W(\bar{x}, \bar{y})}{\partial y} = \frac{\Delta y(\bar{x}, \bar{y})}{f_{MML}}$$

donde $[\bar{x}, \bar{y}]$ son las posiciones de los puntos de referencia, $W(\bar{x}, \bar{y})$ es el frente de onda aberrado, f_{MML} es la distancia focal de la MML y $[\Delta x(\bar{x}, \bar{y}), \Delta y(\bar{x}, \bar{y})]$ es el vector de desplazamientos en

las direcciones x e y , repectivamente.

Para conocer el frente de onda aberrado se utilizan algoritmos de reconstrucción que incluyen la descomposición del frente de onda en la base de los polinomios de Zernike. Utilizando esta base, la fase del frente de onda se expresa:

$$W(\bar{x}, \bar{y}) = \sum_{i=1}^M a_i Z_i(\bar{x}, \bar{y}), \tag{1}$$

donde M es el número de modos de Zernike utilizado en la reconstrucción del frente de onda, $Z_i(\bar{x}, \bar{y})$ es la función Zernike y a_i son los coeficientes de Zernike. Cada polinomio de Zernike representa una aberración en particular y los coeficientes representan el peso de cada término de Zernike. Sustituyendo la Ecuación 2 en la Ecuación 1 se obtiene:

$$\frac{\Delta x(\bar{x}, \bar{y})}{f_{MML}} = \sum_{i=1}^M a_i \frac{\partial Z_i(\bar{x}, \bar{y})}{\partial x}$$

$$\frac{\Delta y(\bar{x}, \bar{y})}{f_{MML}} = \sum_{i=1}^M a_i \frac{\partial Z_i(\bar{x}, \bar{y})}{\partial y}$$

La Ecuación 3 se puede expresar en forma matricial como:

$$\frac{1}{f_{MML}} \mathbf{d} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a} \tag{2}$$

donde \mathbf{d} es el vector de desplazamientos con dimensiones $2N \times 1$, N es el número de microlentes y \mathbf{a} es el vector de coeficientes de Zernike con dimensiones $M \times 1$. La matriz \mathbf{B} , representa las derivadas parciales de los polinomios de Zernike, con dimensiones $M \times 2N$.

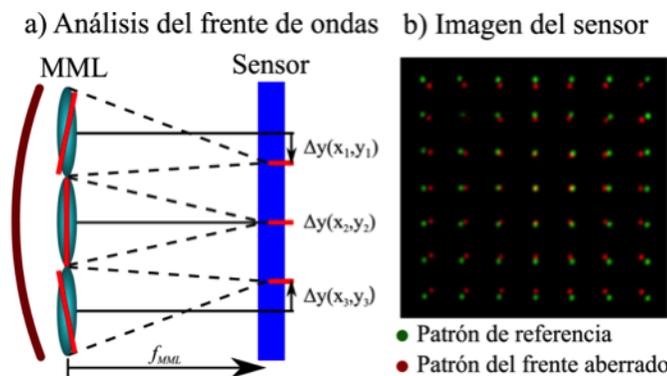


Figura 1 – a) Funcionamiento de un sensor SH. b) Imágenes superpuestas de los patrones de puntos de referencia y aberrado. Si sobre la MML incide un frente de onda plano, cada microlente genera un punto (foco) de referencia (puntos verdes). Si el frente de onda que incide sobre la MML esta aberrado, los puntos experimentan un desplazamiento respecto al eje óptico (puntos rojos).

3 Interfaz Gráfica

El nuevo laboratorio virtual permite conocer *a priori* los desplazamientos experimentados respecto a los puntos de referencia bajo la iluminación de una onda afectada por cualquier tipo de aberración generada y cualquier configuración de la MML, es decir, variaciones en el número de

microlentes y en su focal. En la Figura 2 se muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica desarrollada. La interfaz esta estructurada en dos partes principalmente: La generación del frente de onda y el análisis de éste. Como parámetros de entrada para la generación del frente de onda tenemos el radio de la pupila y la lista de coeficientes de Zernike. El frente de onda generado se muestra en la ventana de la derecha (véase Figura 2). En cuanto a los parámetros de entrada del análisis del frente, podemos introducir la focal de las microlentes. Además, se han implementado dos métodos para definir la geometría de las microlentes que se pueden complementar. Por una parte, podemos introducir el número de microlentes (R) y pulsar el botón **Rejilla**. Esto genera una MML con $R \times R$ microlentes distribuidas uniformemente sobre el frente de onda. Por otra parte, podemos pulsar el botón **Añadir Punto** e indicar una posición sobre el frente de onda. Esto añadirá una microlente en la posición marcada. Pulsando el botón **Limpiar** se eliminan todas las microlentes. Para cada una de las microlentes añadida se muestra la posición de referencia (“+” verde), la posición generada por el frente aberrado (“+” rojo) y, si esta activada la opción **Lineas**, el desplazamiento correspondiente a cada microlente. Las microlentes situadas fuera de la pupila no se muestran, mientras que aquellas cuyo punto desplazado esta situado fuera de la ventana se marcan con una “x” gris. El cálculo de los desplazamientos a partir del frente de onda aberrado dado un valor de la distancia focal se obtiene mediante la Ecuación 4

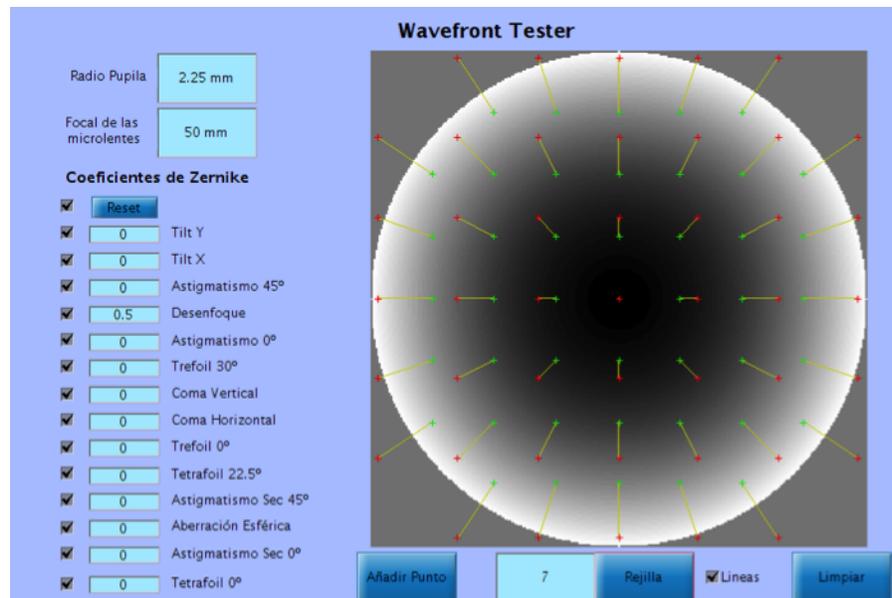


Figura 2 – Pantalla principal de la interfaz gráfica.

4 Resultados

A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos utilizando el laboratorio virtual desarrollado en MATLAB[®]. Empezamos estudiando diferentes configuraciones de la MML para un mismo frente de onda. En la Figura 3 se muestra un frente de onda con un coeficiente de desenfoque de $0.5\mu\text{m}$ y un radio de pupila de 2.25mm analizada mediante dos configuraciones diferentes de MML: diferente distancia focal (f_{MML}) y número de microlentes que muestrea la pupila. Observamos en la Figura 3 que cuando se incrementa la distancia focal aumentan los desplazamientos en ambas direcciones, mientras que si aumentamos el número de microlentes la

pupila está mejor muestreada, pero el tamaño de las lentes disminuye y compromete el rango dinámico del sensor.

En la Figura 4 se muestra el desplazamiento y la aberración de onda generada para desenfoques convergentes y divergentes de diferente magnitud ($0.25\mu m$ y $0.5\mu m$) y una misma configuración de MML (7×7 microlentes con una focal de $50mm$). Se observa que para desenfoques convergentes los puntos se comprimen con respecto al patrón de referencia, mientras que para un desenfoque divergente los puntos se expanden. Además, los desplazamientos son mayores cuanto mayor es el valor absoluto del desenfoque.

En la Figura 5 se muestra el desplazamiento y el frente de onda generado para diferentes tipos de aberraciones con radio de pupila de $2.25mm$ y una MML de 11×11 microlentes con $50mm$ de focal. En la Figura 5(a) se analiza un frente de onda con un coeficiente de astigmatismo a 0° de $-0.50\mu m$ y un desenfoque de $0.25\mu m$. La Figura 5(b) muestra el análisis de un frente de onda con un coeficiente de coma horizontal de $0.25\mu m$. En la Figura 5(c) se muestra un frente de onda cuyo coeficiente de Trefoil a 0° es de $0.25\mu m$. Es la Figura 5 (d) se estudia un frente de onda con una aberración esférica de $0.1\mu m$.

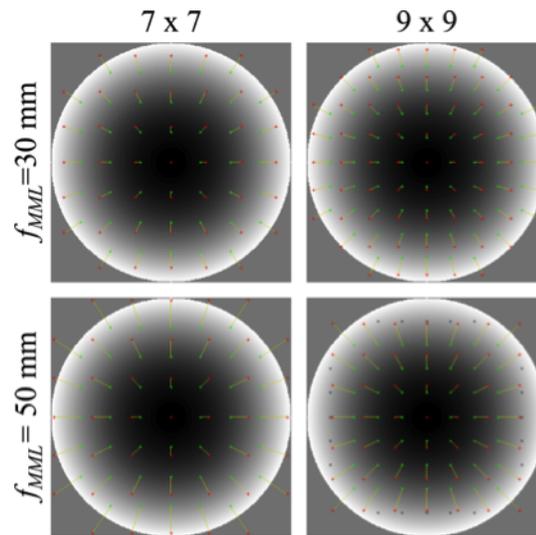


Figura 3 – Desplazamientos y aberración de onda generada para un mismo desenfoque ($0.5\mu m$ con un radio de pupila de $2.25mm$) y diferentes configuraciones de la MML: diferente distancia focal y número de microlentes que muestrea la pupila.

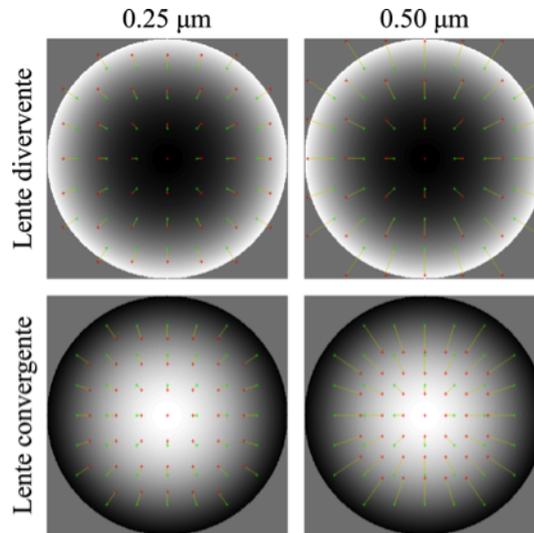


Figura 4 – Desplazamientos y frente de onda generado para desenfoces convergentes y divergentes de diferente magnitud ($0.25\mu m$ y $0.5\mu m$) y una misma configuración de MML (7×7 microlentes con una focal de $50mm$).

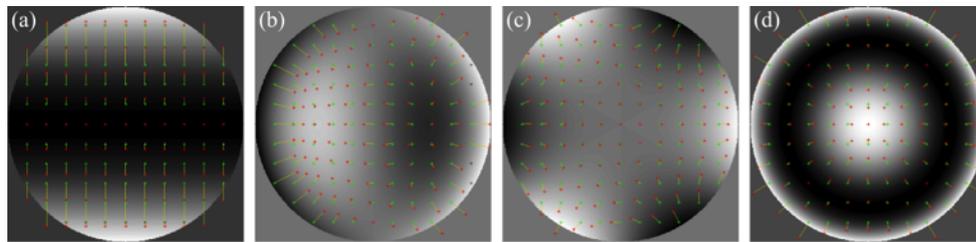


Figura 5 – Análisis de los frentes de onda de una pupila con radio $2.25mm$ y (a) coeficiente de astigmatismo a 0° de $-0.50\mu m$ y desenfoco de $0.25\mu m$, (b) coma horizontal de $0.25\mu m$, (c) Trefoil a 0° de $0.25\mu m$ y (d) aberración esférica de $0.1\mu m$. En todos los casos se ha utilizado una MML de 11×11 microlentes con una distancia focal de $50mm$.

5 Conclusiones

Los sensores de frente de onda son elementos ampliamente utilizados en óptica y física para la medida y posterior corrección del frente de onda. En este trabajo se presenta un laboratorio virtual desarrollado en MATLAB[®] GUI para ser utilizado en la asignatura de “Tecnología de Sensores Optoelectrónicos” que se imparte en el “Máster Universitario en Sensores para Aplicaciones Industriales” de la “Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño” de la Universitat Politècnica de València. Se han presentado algunos ejemplos con diferentes tipos de aberraciones y de distinta magnitud y se ha estudiado la utilización de diferentes configuraciones de la MML para determinar el rango dinámico del sistema. El objetivo de esta aplicación es servir de herramienta informática para mostrar el funcionamiento de un SH. Se pretende implementar un sensor de este tipo en el laboratorio para la medida de elementos ópticos y oftálmicos tales como lentes, pantallas de fase de aberración conocida, . . . De esta manera los resultados obtenidos con el software podrán ser comparados con los obtenidos en el laboratorio.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Instituto de Ciencias de la Educación de la Universitat Politècnica de València y al Vicerectorat de Polítiques de Formació i Qualitat Educativa de la Universitat de València por su apoyo a través del EICE MOMA y de la red UV-SFPIE-DOCE14-222789 respectivamente.

Referencias

-  Feng, F., White, I. H., Wilkinson, T. D. (2014).
Aberration correction for free space optical communications using rectangular Zernike modal wavefront sensing.
Journal of Lightwave Technology 32, 1239–1244.
-  Idir, M., Kaznatcheev, K., Dovillaire, G., Legrand, J., Rungsawang, R. (2014).
A 2D high accuracy slope measuring system based on a Stitching Shack Hartmann Optical Head.
Optics Express 22, 2770–2781.
-  Li, C., Li, B., Zhang, S. (2014).
Phase retrieval using a modified Shack-Hartmann wavefront sensor with defocus.
Applied Optics 53, 618–624.
-  Marino, J., Wöger, F. (2014).
Feasibility study of a layer-oriented wavefront sensor for solar Telescopes.
Applied Optics 53, 685–693.
-  Micó, V., Zalevsky, Z., García, J. (2012).
Superresolved common-path phase-shifting digital inline holographic microscopy using a spatial light modulator.
Optics Letters 37, 4988–4990.
-  Paurisse, M., Hanna, M., Druon, F., Georges, P. (2010).
Wavefront control of a multicore ytterbium-doped pulse fiber amplifier by digital holography.
Optics Letters 35, 1428–1430.
-  Platt, B. C., Shack, R. (2001).
History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing.
Journal of Refractive Surgery 17, 573–577.

Modelling in Science Education and Learning
<http://polipapers.upv.es/index.php/MSEL>