

Colección Congresos

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en <http://inred2014.blogs.upv.es/comites/>

© Vicente Botti Navarro (editor)
Miguel Ángel Fernández Prada (editor)
José Simó Ten (editor)
Fernando Fargueta Cerdá (editor)

© 2014, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6183_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-271-1 (versión cd)

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Estudio de las aberraciones en la formación de imágenes mediante un laboratorio virtual

V. Ferrando^a, L. Remón^b, A. Pons-Martí^c, W. D. Furlan^c y J. A. Monsoriu^a

^aCentro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, viferma1@upvnet.upv.es, ^bAJL Ophthalmic SA, 01510 Miñano (Álava) y ^cDepartamento de Óptica, Universitat de València, 46100 Burjassot (Valencia).

Abstract

In this work we present a virtual laboratory, SIMAG, developed in MATLAB GUI (Graphical User Interface) to be used in Physics or Optics and Ophthalmology courses as an informatic tool which allows to do different Fourier optical computations. With this program the appearance of any image can be computed only convolving the initial object by the Point Spread Function (PSF) of a determined optical system. The PSF is obtained from the aberration map which is provided by commercial machines as do the topographers and the aberrometers.

As an example, this virtual laboratory allows the students to know objectively how does a person with a determined refractive error (myopia, hypermetropia and/or astigmatism) will see or the appearance of determined scene or optotype through an ophthalmic lens. Moreover, this software allows to visualize what kind of aberrations affect more to the image quality.

Keywords: Zernike, aberrations, simulation, Imaging, optical quality.

Resumen

En este trabajo presentamos un laboratorio virtual, SIMAG, desarrollado en MATLAB GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) para su uso en cursos de Física o Óptica y Optometría como una herramienta informática que permite realizar diferentes operaciones de procesado en el campo de la óptica de Fourier. Con el programa se puede determinar la apariencia de cualquier imagen sin más que convolucionar el objeto inicial por la respuesta

impulsional (PSF, del inglés Point Spread Function) de un determinado sistema óptico. La PSF se obtiene computacionalmente a partir del mapa de aberraciones que proporcionan aparatos comerciales tales como topógrafos o aberrómetros.

A modo de ejemplo, este laboratorio permite a los estudiantes conocer de manera objetiva como verá un determinado sujeto con un error refractivo concreto (miopía, hipermetropía o/y astigmatismo) o la apariencia de una determinada escena u optotipo a través de una lente oftálmica. Además, el software permite visualizar que tipo de aberraciones afectan más a la calidad de imagen.

Palabras clave: Zernike, aberraciones, simulación, formación de imágenes, calidad óptica.

1. Introducción

La calidad de imagen en sistemas ópticos formadores de imagen (ej: lentes oftálmicas, microscopios...) cuyos medios son transparentes, está limitada por difracción y aberraciones (Hopkins, 1985). La difracción es inevitable y aparece porque hay un diafragma que limita el ancho del haz que atraviesa el sistema. Sin embargo, las aberraciones son defectos que hacen que las imágenes que produce un sistema óptico no sean perfectas (Comastri, 2011). Para el cómputo de las aberraciones en los últimos años se han desarrollado diferentes tecnologías tales como sensor Shack-Hartmann (Born, 1987), trazado de rayos láser y topógrafos que permiten determinar el mapa de aberraciones total y conocer la magnitud de cada una de las mismas en cualquier sistema óptico.

A partir del mapa de aberraciones medido y utilizando la teoría de Fourier se puede determinar la apariencia de cualquier imagen sin más que convolucionar el objeto inicial por la PSF del sistema (Goodman, 1996). En Óptica, se utiliza esta teoría para estudiar el modo en el cual un sistema transfiere a la imagen la información presente en el objeto.

De esta manera se puede obtener de manera objetiva una representación de como ve por ejemplo un paciente sometido a un determinado tratamiento o la imagen que proporciona un microscopio de una determinada muestra. En este trabajo se presenta un laboratorio virtual dirigido a estudiantes de Óptica y Optometría, en el cual se estudian de manera visual el efecto y la interacción de las diferentes aberraciones sobre la calidad de imagen haciendo uso de la teoría de Fourier.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la creación de un laboratorio virtual como herramienta de aprendizaje de los efectos que tienen las diferentes aberraciones ópticas. En particular, nos centraremos en el efecto introducido por las diferentes aberraciones, descompuestas en la base de polinomios de Zernike, en los sistemas formadores de imágenes.

3. Desarrollo de la innovación

El software desarrollado nos permite analizar la calidad de imagen de una lente cuya distribución de fase se reconstruye a partir de los polinomios de Zernike. Mediante este software estudiaremos, desde un punto de vista didáctico, el efecto de las diferentes aberraciones en la formación de imágenes. Para ello debemos introducir manualmente el valor de los coeficientes de Zernike de la lente a simular o cargar un archivo con la lista de valores (ver Fig. 1). Además, podemos seleccionar la imagen a analizar de una lista de líneas de optotipos de diferentes tamaños o cargar una imagen almacenada en el ordenador. Tras estas selecciones veremos en la fila superior la fase reconstruida de la lente correspondiente y su PSF incoherente, y en la fila inferior tenemos la imagen original y la imagen simulada a través de la lente.

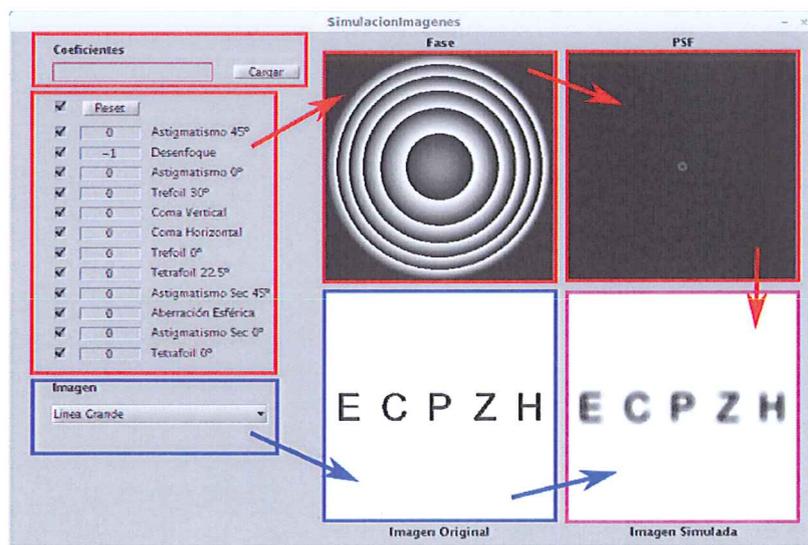


Fig. Interfaz gráfica de la aplicación con el esquema de funcionamiento. En rojo se indican los controles de la lente a analizar y en azul los selectores de la imagen objeto.

3.1. Funcionamiento de la aplicación

Cualquier función bidimensional puede escribirse como una combinación lineal de coeficientes de Zernike que escribimos como:

$$W(x, y) = \sum_i a_i Z_i(x, y),$$

siendo a_i los coeficientes de Zernike y $Z_i(x, y)$ los polinomios de Zernike.

Así pues, en esta aplicación podemos seleccionar hasta el orden 15 que es suficiente para estudiar los efectos de desenfoque, astigmatismos, comma, trefoil, aberración esférica, tetrafoil y todas las combinaciones entre ellos. Los coeficientes de tilt y piston no se toman en cuenta ya que no introducen cambios en la calidad de imagen.

Para obtener la PSF incoherente del sistema calculamos el valor absoluto al cuadrado de la transformada de Fourier bidimensional de la distribución de fase. Dado que la distribución de fase esta muestreada aplicaremos la transformada de Fourier rápida (FFT) bidimensional, que nos queda como

$$PSF_{inc}(x, y) = \left| \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W(k, l) e^{-2\pi i(x-1)(k-1)/N} e^{-2\pi i(y-1)(l-1)/N} \right|^2,$$

donde N es el tamaño en puntos de muestreo de la fase.

Una vez obtenida la PSF incoherente se puede calcular la imagen simulada (Imagen) como la convolución de la imagen original (objeto) por la PSF incoherente del sistema. Esta operación es lenta, por lo que decidimos modificarla y obtener la Imagen mediante la transformada de Fourier del producto de la transformada de Fourier del objeto por la OTF incoherente (transformada de Fourier de la PSF incoherente), es decir,

$$\begin{aligned} \text{Imagen} &= \text{Objeto} \otimes PSF_{inc} = \\ &= \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\text{Objeto}) \cdot \mathcal{F}(PSF_{inc})) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\text{Objeto}) \cdot OTF_{inc}) = \\ &= \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\text{Objeto}) \cdot OTF_{inc}) \end{aligned}$$

siendo \mathcal{F} la transformada de Fourier y \mathcal{F}^{-1} la transformada de Fourier inversa.

4. Resultados

Mediante el software que presentamos se han realizado diferentes estudios, con carácter docente, del efecto de las aberraciones en la calidad óptica de las imágenes formadas. En ellos se observa como se modifica la imagen original al cambiar los coeficientes de Zernike de la lente analizada.

En la Fig. 2 vemos como afecta el parámetro del desenfoque a la formación de imágenes para la línea de optotipos. Se puede observar que los desenfoques positivos y negativos tienen el mismo efecto sobre la imagen.

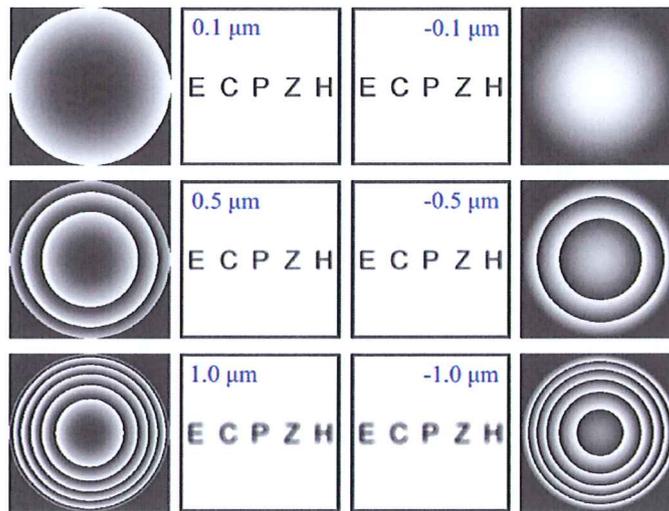


Fig. 2 Simulación de la formación de imagen a través de lentes con diferentes valores para el coeficiente de desenfoque.

En la Fig. 3 estudiamos el efecto de los astigmatismos a 0° y 45° para valores positivos y negativos del coeficiente correspondiente compensados con un desenfoque del mismo valor absoluto.

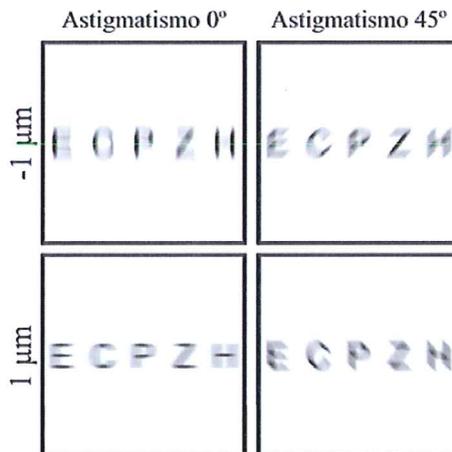


Fig. 3 Simulación de imagen a través de lentes astigmáticas con valores de diferente signo para los coeficientes de astigmatismo a 0° y 45° compensadas con un coeficiente de desenfoque de $1\mu\text{m}$.

Para estudiar el fenómeno conocido como inversión de contraste utilizaremos como objeto la imagen de la estrella de Siemens. En la Fig. 4 se pueden comparar la imagen original y la simulación a través de una lente cuyo coeficiente de desenfoque es de $1 \mu\text{m}$. Se observa como en ciertos intervalos radiales el valor de la imagen obtenida esta invertido respecto al del objeto.

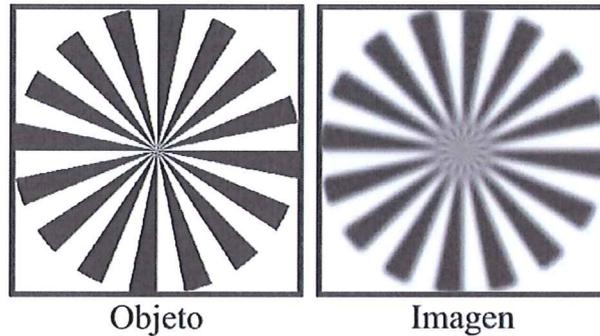


Fig. 4 Imagen de la estrella de Siemens formada por una lente con un coeficiente de desenfoque de $1 \mu\text{m}$.

Finalmente estudiamos el efecto de la compensación de aberración esférica en la formación de imágenes. Para ello suponemos una aberración esférica fija de $1 \mu\text{m}$ y cambiaremos el desenfoque. En la Fig. 5 podemos comparar las imágenes obtenidas con diferentes intensidades del desenfoque. Vemos que con un desenfoque de alrededor de $2 \mu\text{m}$ se puede compensar parcialmente la aberración esférica de $1 \mu\text{m}$.



Fig. 5 Imágenes formadas por lentes con un coeficiente de aberración esférica de $1 \mu\text{m}$ compensado parcialmente con diferentes coeficientes de desenfoque.

5. Conclusiones

El software propuesto permite estudiar el efecto de las aberraciones presentes en cualquier sistema óptico en la calidad de imagen que éste proporciona. Los ejemplos presentados muestran claramente como ciertos valores de aberraciones tales como desenfoque, astigmatismo o aberración esférica influyen en la apariencia de un determinado objeto y como la interacción entre aberraciones produce una mejoría de la apariencia del mismo. Desde el punto de vista didáctico, el programa permite estudiar ciertos aspectos de la teoría de Fourier y la teoría utilizada en Óptica Física y Geométrica para evaluar el comportamiento de sistemas formadores de imágenes, es decir, se explican conceptos referentes a la aberración de onda (W), la respuesta impusional (PSF) y se analiza el uso de los coeficientes de Zernike. El software propuesto va dirigido a estudiantes que proceden de carreras universitarias tales como Física y/o Óptica y Optometría. En el último caso, será de gran utilidad ya que se puede obtener de manera objetiva una representación de como ve el paciente sometido a un determinado tratamiento.

6. Agradecimientos

Los autores de los Grupos de Innovación Docente MoMa de la Universitat Politècnica de València e IndopTIC (GCID35/2009) de la Universitat de València, agradecen el apoyo institucional y económico recibido de sus respectivas universidades para el desarrollo de sus proyectos de innovación. Por último, los dos grupos agradecen al Vicerrectorado de Cultura e Igualdad de la Universitat de València, su apoyo para la constitución de la Red Valenciana de Innovación Educativa.

7. Referencias

HOPKINS, H.H. (1985) "Image formation by a general optical system. 1: General Theory" en *Applied Optics*, vol. 24, issue 16, p. 2491-2505.

COMASTRI, S.A., MARTÍN, G. y BIANCHETTI, A. (2011) "Variación de las aberraciones introducidas por una lente oftálmica monofocal al modificar la pupila" en *Universidad de Belgrano*, nº 256, p. 1-14.

BORN, M. y WOLF, B. (1987). *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press.

GOODMAN, J.W. (1996). *Introduction to Fourier Optics*. New York: Mc Graw-Hill.