

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 600 503**

21 Número de solicitud: 201600605

51 Int. Cl.:

G01M 11/02

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

21.07.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

09.02.2017

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
(100.0%)**

**Sección de Contratos y Patentes (Otri), Centro de
Investigación y Transferencia Complutense. Fac.
de Medicina (Edificio Entrepabellones 7 y 8)
Doctor Severo Ochoa, 7 Ciudad Universitaria
28040 Madrid ES**

72 Inventor/es:

**SÁNCHEZ BREA, Luis Miguel y
TORCAL MILLA, Francisco José**

54 Título: **Dispositivo optoelectrónico y métodos para determinar parámetros ópticos de una lente o un sistema de lentes**

57 Resumen:

Dispositivo optoelectrónico y métodos para determinar parámetros ópticos de una lente o un sistema de lentes.

La presente invención se refiere a un dispositivo optoelectrónico para determinar parámetros ópticos de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes 5, como son la posición de los planos principales y de los planos focales y las distancias focales, y a métodos para determinar estos parámetros. El dispositivo comprende un elemento de colimación 2, una red de difracción 4 de periodo p conocido, un sistema de detección 6, que puede ser una matriz de fotodetectores lineal o bidimensional CCD o CMOS, uno o más elementos de procesamiento de datos 7 y un dispositivo de desplazamiento 8, por ejemplo un motor lineal, para desplazar el sistema de detección 6 a lo largo del eje óptico del dispositivo. La lente, sistema de lentes o sistema óptico formador de imagen incógnita 5 se coloca entre la red de difracción 4 y el sistema de detección 6.

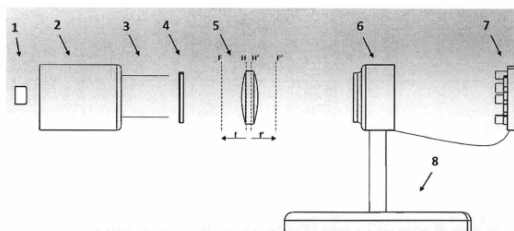


Figura 1

DESCRIPCIÓN

Dispositivo optoelectrónico y métodos para determinar parámetros ópticos de una lente o un sistema de lentes.

Sector de la técnica

La presente invención se encuadra en el sector de Tecnología Óptica y más concretamente en el sector de Dispositivos Optoelectrónicos.

Estado de la técnica

Dentro de las aplicaciones ópticas, uno de los parámetros más importantes para la caracterización de lentes o sistemas ópticos es la distancia focal, definida como la distancia entre el plano principal de la lente o sistema óptico y el plano focal. Su conocimiento preciso es de crucial importancia en multitud de aplicaciones, sobre todo cuando los sistemas ópticos se utilizan en aplicaciones metrológicas.

Existen métodos sencillos y bien conocidos para determinar de forma aproximada la distancia focal de una lente o un sistema óptico. Uno de ellos es el método de auto-colimación, en el que se comparan las dimensiones transversales de un haz de luz a diferentes distancias de la fuente de luz. Se concluye que el haz resulta colimado cuando dichas dimensiones son iguales a todas las distancias de la fuente. Esta técnica se puede implementar visualmente y también se puede automatizar mediante el uso de un elemento optoelectrónico.

Por otro lado, las técnicas interferométricas se encuentran entre las más precisas para la determinación de la distancia focal de una lente o un sistema óptico, siendo conocidas desde hace varias décadas [D. Malacara, ed., *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1978)].

Otros métodos se basan en deflectometría moiré usando dos redes de difracción y analizando las franjas de moiré producidas tras la segunda red cuando el haz de luz converge a través de ellas: Y. Nakano, K. Murata, *Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens*, *Applied Optics* 24 (1985) 3162-3166; K. M. Keren, E. Kreske, and O. Kafri, *Universal method for determining the focal length of optical systems by moire deflectometry*, *Applied Optics* 27 (8) (1998) 1383-1389.

En la referencia S. Lee, *Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens without moire fringes*, *Journal of the Optical Society of Korea* 19 (2015) 165-168, se propone un método con una única red de difracción que consiste en medir las frecuencias espaciales resultantes en el plano focal de la lente bajo análisis y compararlas con las frecuencias espaciales de la propia red de difracción.

En la referencia J.-J. Wu, J.-B. Chen, A.-C. Xu, X.-Y. Gao, S. Zhuang, *Focal length measurement based on hartmann-shack principie*, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 123 (6) (2012) 485-488, los autores utilizan un sensor Hartmann-Shack para determinar el plano focal de la lente bajo estudio, midiendo el desplazamiento de los diversos focos del sensor respecto a su posición nominal y extrayendo de dichas medidas la vergencia del haz de luz y por lo tanto la posición del plano focal.

Asimismo, es posible determinar la distancia focal de una lente mediante la medida de la variación de periodo de las autoimágenes con respecto a la distancia entre las mismas a lo largo del eje óptico [M. Tebaldi, G. Forte, R. Torroba, N. Bolognini, A. Tagliaferri. *Self-imaging pitch variation applied to focal length digital measurements. Optics Communications* 250 (2005) 10-15). La ventaja de utilizar las autoimágenes de una red de difracción para determinar los parámetros ópticos de una lente o sistema de lentes es que las rendijas que la forman están ubicadas de una forma muy precisa, con incertidumbres mínimas de hasta 3 nm en el posicionado, ya que se utilizan técnicas fotolitográficas de gran precisión para su grabado.

Por otra parte, en H Wu, J Yang, L Qiu, W Zhao. *Measuring the lens focal length by laser confocal technique. Proc. of SPIE Vol. 8916 89161E-1 (2013)*, se propone una técnica confocal láser para determinar la focal de una lente donde se muestra que la incertidumbre expandida puede llegar a ser hasta del 0.002%.

Además, en la solicitud de patente US 2011/0149273 A1 titulada "Method and system for measuring a focal length of an optical lens", se muestra un sistema para medir la distancia focal de una lente que consta de un dispositivo de procesamiento de imagen y una plataforma de operación. El método consiste en desplazar el sistema de procesamiento de imagen a lo largo del eje óptico almacenando el tamaño del haz de luz focalizado. Así se determina el plano focal como aquél en el que el haz de luz presenta el tamaño transversal menor.

La patente ES-2393518 T3, titulada "Dispositivo y procedimiento para detectar la posición focal de un sistema óptico y dispositivo de tratamiento oftalmológico", se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para detectar la posición focal de un sistema óptico. En particular, la invención se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para detectar la profundidad focal de un sistema óptico de formación de imágenes y, además, también a un dispositivo y un procedimiento para controlar la posición focal y, en particular, la profundidad focal. Para ello, la invención facilita un dispositivo para detectar la posición focal de un sistema óptico con una fuente de iluminación, un sistema de formación de imágenes enfocante, una superficie al menos parcialmente reflectante en el foco, un sistema sensor digital adecuado (por ejemplo, una cámara CCD, una cámara CMOS o similares) para registrar una imagen reflejada por la superficie citada, un ordenador para procesar la imagen registrada por la cámara y un elemento óptico en la trayectoria de los rayos del sistema óptico, antes del sistema de formación de imágenes enfocante, que influye sobre la imagen citada dependiendo de la posición focal.

Siguen siendo necesarios, sin embargo, nuevos dispositivos y nuevos métodos para medir de forma sencilla los parámetros ópticos de lentes y sistemas de lentes con mayor precisión.

Descripción detallada de la invención

Dispositivo optoelectrónico y métodos para determinar parámetros ópticos de una lente o un sistema de lentes

La presente invención se refiere a un dispositivo optoelectrónico que permite medir los parámetros ópticos de una lente, sistema de lentes o sistema óptico formador de imágenes. En esta memoria descriptiva, se entiende por "parámetros ópticos": la posición de los planos principales, la posición de los planos focales y la distancia focal, que es la

distancia entre los planos focales y los respectivos planos principales. Se entiende por "haz de luz" o, simplemente, "haz" cualquier tipo de haz de luz y de haz láser. Se entiende por "sistema óptico" una lente o un conjunto de lentes refractivas, difractivas o mezcla de ambas.

5

Un esquema de los parámetros ópticos que se pueden determinar con esta invención para una lente o un sistema de lentes se muestra en la Figura 1. Aquí se muestran los planos principales H y H' (para cada uno de los lados del sistema), los planos focales F y F', y las distancias focales f y f'. Hay que considerar que los parámetros descritos no son invariantes, sino que dependen de la longitud de onda, pues en muchos casos, los sistemas no son acromáticos. Por otro lado, si el medio es el mismo a ambos lados de la lente, sistema de lentes o sistema óptico formador de imágenes, f y f' son iguales, $f = f'$.

10

Un esquema del dispositivo de la invención se muestra en la Figura 1. Mediante un sistema de colimación 2, colimando un haz procedente de una fuente de luz 1, se obtiene un haz de luz colimado 3. Para medir los parámetros ópticos, en la presente invención se utiliza una red de difracción 4. Al propagarse la luz a través de la red de difracción, debido a efectos difractivos, se generan autoimágenes a varias distancias de la misma. Si λ es la longitud de onda media del haz de luz, y p es el periodo de la red de difracción que modula la amplitud de dicha onda, las autoimágenes generadas se ubican a distancias múltiplos enteros o semi-enteros de la distancia de Talbot $z_T = 2p^2/\lambda$. Dichas autoimágenes, que tienen un periodo p idéntico a la red de difracción 4, atraviesan el sistema óptico o sistema óptico incógnita 5, cuyos parámetros ópticos se desean determinar, y esta luz estructurada converge o diverge dependiendo del sistema óptico incógnita. La distribución de intensidad luminosa se captura en distintas posiciones a continuación del sistema óptico a lo largo del eje óptico mediante un sistema de detección 6, que suele ser una matriz de fotodetectores como puede ser una cámara CMOS o CCD. Finalmente, los datos son procesados mediante uno o varios elementos de procesamiento de datos 7 para el procesamiento de las señales recibidas por el sistema de detección 6, como pueden ser una placa electrónica o un ordenador. Es necesario también un dispositivo de desplazamiento 8, como por ejemplo un motor lineal, para desplazar el sistema de detección 6 que sirve para capturar la distribución de intensidad luminosa.

20

25

30

35

40

45

En la referencia M. Tebaldi, G Forte, R. Torroba, N. Bolognini, A. Tagliaferri. *Self-imaging pitch variation applied to focal length digital measurements. Optics Communications* 250 (2005) 10-15, se describe un sistema que utiliza un haz colimado y una red de difracción de periodo p para medir, únicamente, la distancia focal de la lente. Para ello se determina, por una parte, la distancia entre dos autoimágenes y, por otra, el periodo de las autoimágenes después de que la luz que atraviesa la lente cuya distancia focal se desea determinar, que puede ser convergente o divergente, incide sobre una red de difracción. En la presente invención se modifica el dispositivo mostrado por Tebaldi *et al.*, mejorándolo. Por un lado, se intercambia la posición entre la red de difracción y el sistema óptico incógnita. Este cambio es muy significativo pues, de esta forma, es posible conocer más parámetros del sistema óptico incógnita, como son la posición de los planos principales y los planos focales, además de la distancia focal.

50

Por otro lado, se propone un método distinto y más preciso de análisis de los datos. Con todo ello, es posible obtener los parámetros con una incertidumbre de hasta un orden de magnitud menor que en el trabajo de Tebaldi *et al.* En lugar de medir únicamente en dos posiciones de autoimágenes, en la presente invención se puede medir en una

multiplicidad de posiciones de forma que se obtiene un mayor número de datos experimentales. Para ello, el dispositivo de la invención incluye un dispositivo de desplazamiento así como un sistema de detección que puede estar constituido por matrices lineales o bidimensionales de fotodetectores. De esta forma se puede obtener una interpolación lineal a los datos experimentales y también determinar los intervalos de confianza en la estimación, con lo que se puede analizar la incertidumbre cometida en el cálculo de los parámetros ópticos.

Un aspecto de la presente invención se refiere, pues, a un dispositivo para determinar los parámetros ópticos de un sistema óptico compuesto por una lente o sistema de lentes que comprende:

- una fuente de luz **1**, preferentemente monocromática, que puede ser láser,

- un sistema de colimación **2**, que genera un haz colimado **3**,

- una red de difracción **4**, de periodo p conocido,

- un sistema de detección **6**,

- uno o más elementos de procesamiento de datos **7**.

- un dispositivo de desplazamiento **8**, para desplazar el sistema de detección **6** a lo largo del eje óptico,

donde el sistema óptico del cual se quieren determinar los parámetros o sistema óptico incógnita **5**, se sitúa entre la red de difracción **4** y el sistema de detección **6**, a lo largo del eje óptico.

Desde el punto de vista electrónico, la configuración más rápida para el procesamiento de datos es ubicar una matriz lineal de fotodetectores como sistema de detección **6**. Sin embargo, también es posible utilizar una cámara formada por una distribución bidimensional de fotodetectores, como es una cámara CCD o una cámara CMOS. Entre los elementos para el procesamiento de datos **7** se pueden seleccionar una placa electrónica, un microprocesador o un ordenador. Por otro lado, el dispositivo de desplazamiento **8** puede ser un motor lineal o un posicionador manual.

Otro aspecto de la invención se refiere a un procedimiento óptico para determinar los parámetros ópticos de una lente o un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes. Un sistema de colimación **2** genera un haz colimado **3**, preferentemente monocromático. De forma matemática, este haz colimado se puede describir mediante una onda plana que, cuando se propaga a lo largo del eje óptico de la lente resulta ser $U_1(z) = U_0 e^{ikz}$. Esta onda plana incide sobre una red de difracción **4** de periodo p de forma que, considerando la aproximación de elemento delgado, válida cuando el periodo de la red es mayor que la longitud de onda, la transmitancia de la red resulta

$$t(x) = \sum_n a_n e^{iqnx}, \quad (\text{Ec. 1})$$

donde n son número enteros, a_n son los coeficientes de Fourier de la red de difracción, x es la coordenada lateral perpendicular al eje óptico y paralela a la red de difracción y $q = 2\pi/p$. El campo, justo tras atravesar la red de difracción 4, $z = 0$, resulta ser

$$U_2(x) = U_1 t(x). \quad (\text{Ec. 2})$$

La distribución de intensidad, después de que la luz atraviese la red de difracción 4, viene determinada por la aproximación de Fresnel, resultando

$$U_3(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda z}} e^{ikz} \int U_2(\xi) e^{i\frac{k}{2z}(x-\xi)^2} d\xi. \quad (\text{Ec. 3})$$

Esta integral se puede resolver de forma sencilla, resultando

$$U_3(x, z) = U'_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{2\pi i n \frac{x}{p}} e^{i2\pi n^2 z/z_T}, \quad (\text{Ec. 4})$$

donde $z_T = 2p^2/\lambda$ es la distancia de Talbot y U'_0 es una constante que recoge todos los parámetros no dependientes de la posición. Esta distribución indica que el campo, tras atravesar la red de difracción 4, presenta autoimágenes. Como el haz de luz está colimado, las autoimágenes formadas tienen un periodo idéntico al de la red de difracción. Posteriormente, este campo atraviesa el sistema óptico incógnita 5, cuya transmitancia se describe como

$$L(x) = e^{-ik\frac{x^2}{2f}}, \quad (\text{Ec. 5})$$

donde f es la distancia focal del sistema óptico incógnita 5. El campo propagado tras atravesar dicho sistema óptico incógnita 5 resulta $U_4(x, z) = U_3(x, z)L(x)$. A continuación, el campo en posiciones posteriores al sistema óptico incógnita 5 (es decir, después de que el haz de luz atraviese el sistema óptico incógnita 5) se vuelve a calcular mediante la propagación de Fresnel

$$U_4(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda z}} e^{ikz} \int U_3(\xi) e^{i\frac{k}{2z}(x-\xi)^2} d\xi. \quad (\text{Ec. 6})$$

Esta integral se resuelve de forma sencilla obteniéndose

$$U_4(x, z) = U''_0 \sum a_n e^{-i\frac{kx^2}{2(f-z)}} e^{-i\frac{nqf}{2k(f-z)}} (nqz - 2kx). \quad (\text{Ec. 7})$$

Sobre un plano perpendicular al eje óptico del sistema se ubica un sistema de detección que es capaz de obtener, no el campo, sino la intensidad óptica o irradiancia,

$$I(x, z) = U_4(x, z)U_4^*(x, z), \quad (\text{Ec. 8})$$

siendo *el valor complejo conjugado del campo. Utilizando el valor de la Ec. 8, se obtiene que la distribución de intensidad óptica resulta

$$I(x, z) = I_0 \sum_n \sum_{n'} a_n a_{n'}^* e^{i \frac{q(n-n')x}{1-z/f}} e^{-i \frac{q^2 z (n^2 - n'^2)}{2k(1-z/f)}}, \quad (\text{Ec. 9})$$

donde I_0 es un parámetro que recoge todos los parámetros que no afectan al periodo o forma de las autoimágenes. Los sumatorios dan cuenta de los distintos armónicos presentes en la distribución de intensidad. El primer término exponencial da cuenta del periodo de las autoimágenes a una cierta distancia z . Este periodo resulta ser

$$p' = p \left(1 - \frac{z}{f} \right), \quad (\text{Ec. 10})$$

donde p es el periodo de la red de difracción **4** y p' es el periodo de la autoimagen. La distancia focal tiene signo positivo para lentes convergentes y signo negativo para lentes divergentes, por lo que el periodo disminuye para las lentes o sistemas de lentes convergentes ($f > 0$) y aumenta para las lentes o sistemas de lentes divergentes ($f < 0$). Cuando el sistema es afocal, entendemos que $f \rightarrow \infty$, y entonces el periodo de las autoimágenes es igual al periodo de la red de difracción utilizada. En la Figura 2, se muestra el ejemplo de distribución de intensidad según la Ec. 9 para una lente convergente.

En la presente invención se requiere medir el periodo de las autoimágenes en diversas posiciones z . Aquí z se refiere a la distancia al plano principal ya que, cuando $z = 0$, el periodo de la autoimagen es igual al periodo de la red de difracción **4**. Sin embargo, el valor de las distancias no se conoce respecto al plano principal, sino que está referenciado a otro sistema de coordenadas, como el del dispositivo de desplazamiento **8** que mueve el sistema de detección **6**, y que, preferentemente, es una matriz de fotodetectores. Por ello, la relación matemática que se utiliza resulta ser

$$p' = p \left(1 - \frac{z - z_c}{f} \right), \quad (\text{Ec. 11})$$

donde z_c es un valor desconocido.

Para determinar la posición del plano principal tenemos que tomar diversos datos experimentales de la relación posición $z' = z - z_c$ frente al periodo de la autoimagen a esa distancia, p' . Según la Ec. 10 esta relación es lineal. Para determinar la posición del plano principal H' , se busca la posición z' donde el periodo de la autoimagen es igual al periodo de la red de difracción **4**, $p' = p$. Para determinar la posición del plano focal F' se busca la posición z' donde el periodo de la autoimagen es igual a 0, $p' = 0$.

Por lo tanto, otro aspecto de la invención se refiere a un método para determinar la posición del plano principal H y/o del plano principal H' de una lente, de un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** que incluye los siguientes pasos:

- 5 a- obtener la constante z_c colocando un sistema de detección **6** en el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5**;
- 10 b- desplazar el sistema de detección **6** a lo largo del eje óptico, separándolo de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5**;
- 15 c- capturar un número n de autoimágenes generadas por un haz de luz colimado **3** que atraviesa una red de difracción **4** de periodo p conocido y, a continuación, atraviesa la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** cuyo plano principal H o H' se desea conocer;
- d- obtener el perfil de intensidad de cada una de las n autoimágenes mediante integración de la imagen paralelamente a las rendijas de la red de difracción **4**;
- 20 e- determinar el periodo p' de cada una de las n autoimágenes obtenidas a cada distancia z' entre el sistema de detección **6** y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** más cercano al sistema de detección **6**;
- f- realizar la interpolación lineal de los datos obtenidos en el paso e- en función de z' ;
- 25 g- determinar la distancia z' entre el sistema de detección **6** y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** más cercano al sistema de detección **6**, para la que el periodo p' de la autoimagen es igual al periodo p de la red de difracción **4**, es decir, $p' = p$, y calcular la incertidumbre dada por la interpolación lineal.
- 30

El vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** es el punto de su eje central por el que pasa el eje óptico del conjunto en el que se integra el haz de luz colimado **3**.

35 Es de interés en este método que el número de autoimágenes n sea siempre mayor de 2. Por otro lado, el haz de luz colimado **3** del paso c- es, preferentemente, monocromático.

40 La determinación del periodo p' que se describe en el paso e- de este método se realiza, preferentemente, mediante la función variograma y según la ecuación $2\gamma = \langle [I(x+h) - I(x)]^2 \rangle_x$, una interpolación lineal de los mínimos del variograma: $x = np'$ y una interpolación lineal de los periodos obtenidos en función de la distancia z' , $p' = az' + b$, donde $\langle \rangle$ representa el valor medio, n es el orden de los mínimos del variograma, x es la coordenada paralela a las franjas, I es la señal periódica obtenida y h es la distancia entre píxeles del sistema de detección.

45 La invención también se refiere a un método para determinar la posición de los planos focales F y/o F' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita **5**, que incluye los siguientes pasos:

50

a- determinar la constante z_c colocando un sistema de detección **6** en el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5**, vértice que, como ya se ha indicado, es el punto del eje central de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes por el que pasa el eje óptico del conjunto;

b- desplazar el sistema de detección **6** a lo largo del eje óptico, separándolo de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5**;

c- capturar un número $n > 2$ de autoimágenes generadas por un haz de luz colimado **3**, preferentemente monocromático, que atraviesa una red de difracción **4** de periodo p conocido y, a continuación, atraviesa la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** cuyo plano focal F o F' se desea conocer;

d- obtener el perfil de intensidad de cada una de las n autoimágenes mediante integración de la imagen paralelamente a las rendijas de la red de difracción **4**;

e- determinar el periodo p' de cada una de las n autoimágenes obtenidas a cada distancia z' entre el sistema de detección **6** y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** más cercano al sistema de detección **6**;

f- realizar la interpolación lineal de los datos obtenidos en el paso e- en función de z' ;

g- determinar la distancia z' entre el sistema de detección **6** y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** más cercano al sistema de detección **6**, para la que el periodo p' de la autoimagen es 0, es decir, $p' = 0$, y calcular la incertidumbre dada por la interpolación lineal.

La determinación del periodo p' del paso e-se realiza, preferentemente, mediante la función variograma r según la ecuación $2\gamma = \langle [I(x+h) - I(x)]^2 \rangle_x$, una interpolación lineal de los mínimos del variograma: $x = np'$ y una interpolación lineal de los periodos obtenidos en función de la distancia z' , $p' = a z' + b$, donde $\langle \rangle$ representa el valor medio, n es el orden de los mínimos del variograma, x es la coordenada paralela a las franjas, I es la señal periódica obtenida y h es la distancia entre píxeles del sistema de detección.

Además, la invención se refiere a un método para determinar la distancia focal f y/o la distancia focal f' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita **5** que incluye los siguientes pasos:

a- determinar la posición del plano principal H o H' tal y como se describe en esta

b- determinar la posición del plano focal F o F' tal y como se describe en esta memoria;

c- determinar la distancia entre el plano principal H o H' obtenido en el paso a- y el plano focal F o F' obtenido en el paso b-, y calcular la incertidumbre como propagación de errores del plano principal y plano focal.

Breve descripción de las Figuras

Figura 1. Muestra, de forma esquemática, la configuración básica del dispositivo para medir los parámetros ópticos de un sistema óptico: fuente de luz **1**, sistema de colimación **2**, haz colimado **3**, red de difracción **4**, lente o sistema óptico incógnita **5** del que se

quieren obtener los parámetros ópticos, sistema de detección **6**, elementos de procesamiento de datos **7** y dispositivo de desplazamiento **8** para el movimiento preciso del sistema de detección **6**. H y H' son los planos principales anterior y posterior del sistema óptico incógnita **5**, F y F' son los planos focales anterior y posterior, y f y f' son las distancias focales anterior y posterior.

Figura 2. Ejemplo de distribución de intensidad tras atravesar el sistema óptico incógnita **5**, calculada mediante la Ec. 9.

Figura 3. Se muestra la distribución de intensidad experimental tras atravesar el sistema óptico incógnita **5** para el caso de una lente convergente modelo KPX223 de Newport cuando la fuente de iluminación utilizada **1** es un diodo láser pigtaledado a fibra óptica de longitud de onda 670 nanómetros.

Figura 4. En la Figura 4a, se muestra el perfil de intensidad experimental de la Figura 3 para una determinada distancia $z' = 27,5 \text{ mm}$, donde se ubica el sistema de detección **6** y, en la Figura 4b, se muestra el variograma para dicha posición. En la Figura 4b, la línea continua representa el variograma calculado como se describe en el ejemplo 1, los círculos representan los datos del ajuste cuadrático al mínimo, la línea continua representa los valores determinados del variograma y las estrellas representan la posición del mínimo de intensidad obtenida con el método del ejemplo 1. Se muestra también una amplificación de la imagen para su mejor observación.

Figura 5. Se muestra la relación experimental entre el periodo y la distancia para el ejemplo de la Figura 3. Las estrellas representan el periodo experimental obtenido para cada una de las posiciones z' . La línea continua representa la interpolación lineal de estos datos experimentales. Las líneas discontinuas horizontales representan las posiciones $p' = 0$ y $p' = 105$ micrómetros utilizadas para obtener la posición del plano focal y del plano principal, respectivamente. Se muestra también una amplificación de la imagen para su mejor observación. En la amplificación, las líneas discontinuas representan el intervalo de confianza utilizado para el cálculo del error en el posicionado.

Figura 6. Se muestran los residuos, R , (línea continua) e intervalo de confianza (línea discontinua) asociadas a la interpolación lineal para el ejemplo de la Figura 5.

Figura 7. Se muestra la distribución de intensidad tras atravesar la lente para una lente divergente modelo KPC076 de Newport, cuya focal nominal es de -100 mm y cuyo error nominal es $\pm 1 \%$.

Figura 8. Se muestra la relación experimental entre el periodo y la distancia para el ejemplo de la Figura 7. Las estrellas representan el periodo experimental obtenido para cada una de las posiciones de detección de la matriz de fotodetectores a lo largo de z' . La línea continua representa el ajuste lineal de estos datos experimentales extrapolado al intervalo entre $p' = 0$ y $p' = 105$ micrómetros. Las líneas discontinuas horizontales representan las posiciones $p' = 0$ y $p' = 105$ micrómetros utilizadas para obtener la posición del plano focal y del plano principal, respectivamente. Se muestran también dos amplificaciones de la imagen para su mejor observación. En la amplificación (a) las líneas discontinuas representan el intervalo de confianza utilizado para el cálculo del error en el posicionado. En la amplificación (b) las estrellas representan el periodo experimental obtenido para cada una de las posiciones de detección de la matriz de fotodetectores a lo largo de z' .

Modo de realización de la invención

Una vez definida la geometría del sistema y el proceso de medida, a continuación se presentan ejemplos de dispositivos para medir los parámetros ópticos de un sistema óptico, un sistema de lentes o una lente, como son sus planos principales, planos focales y distancias focales.

Los ejemplos se han realizado con una única lente. En el caso de un sistema de lentes o de sistemas ópticos formadores de imágenes con dos o más lentes, los ensayos se realizarían de la misma manera, pero se consideraría el sistema de lentes o el sistema óptico como un elemento unitario y se tomarían las medidas por los dos lados del sistema, es decir, incidiendo con el haz de luz por un lado o el otro del sistema, sin variar la distancia o posición relativa entre los distintos elementos del sistema de lentes.

Ejemplo 1. Medición de los parámetros ópticos de una lente convergente.

Se fabricó un dispositivo para medir los parámetros ópticos de una lente convergente. Como fuente de iluminación **1** se utilizó un diodo láser pigtaleadado a fibra óptica de longitud de onda 670 nanómetros y, posteriormente, colimado mediante una lente colimadora como sistema de colimación **2**.

Se utilizó una red de difracción **4** de amplitud, de rendijas de cromo sobre vidrio con un periodo $p = 105$ micrómetros.

La lente que se midió es el modelo KPX223 de Newport, que tiene un diámetro de 76,2 milímetros y una distancia focal nominal, dada por el fabricante, $f = +100$ milímetros, con una incertidumbre en la distancia focal de ± 1 milímetro (1 %).

Como sistema de detección **6** de las autoimágenes utilizamos una cámara CMOS modelo UI-1492LE de la firma IDS, cuyo tamaño de pixel es de 1.67×1.67 micrómetros.

Para el movimiento de la cámara, de forma que se pudieran medir a diversos planos, se utilizó un sistema motorizado, modelo M-500-PS de la firma PI, como dispositivo de desplazamiento **8**.

Para el tratamiento de los datos obtenidos, se utilizó un programa informático basado en Matlab sobre un PC, como elemento de procesamiento de datos **7**. También se utilizó este programa para sincronizar el movimiento del sistema motorizado con las capturas de imágenes.

Para obtener una posición absoluta en relación con la lente (constante z_c), se aproximó la cámara hasta que llegó a tocar el vértice de la lente, es decir, el punto de la lente por el que pasa el eje óptico del dispositivo. De esta forma se convirtió el sistema de coordenadas del sistema motorizado al sistema de referencia de la lente, mediante el valor z_c , sustrayéndolo del valor de z dado por el sistema motorizado. A partir de aquí se desplazó la cámara a lo largo del eje óptico, separándola de la lente, y se capturó una imagen para cada distancia seleccionada. Para la obtención de la distribución de intensidad de la autoimagen se sumaron los píxeles por columnas verticales paralelas a las franjas de la autoimagen. De esta forma se obtuvo la Figura 3 que muestra la distribución de intensidad capturada por la cámara en diversos planos, en una captura cuasicontinua de planos.

Una vez obtenida la distribución de intensidad en diversos planos de observación se determinó el periodo de las autoimágenes. Para ello, existen numerosos métodos como: la determinación de las posiciones de los mínimos de intensidad, ajustes a funciones predefinidas periódicas o pseudoperiódicas, etc. Para el caso particular de esta invención, consideramos que el periodo de las franjas es independiente de la posición lateral x . Se utilizó la función variograma para filtrar las señales luminosas y determinar de forma precisa las posiciones de los mínimos de intensidad (*L.M. Sanchez-Brea et al. Self-imaging technique for beam collimation. Optics Letters 39(19) 5764-5767, 2014.*). Para la distribución de intensidad a cada una de las distancias se obtuvo el variograma y, de este variograma, se determinaron los mínimos con el objeto de poder medir el periodo de las autoimágenes. Los mínimos se calcularon mediante un ajuste parabólico en torno a cada uno de los mínimos del variograma. Como ejemplo, en la Figura 4a se muestra un perfil y en la Figura 4b el variograma correspondiente obtenido. Para este caso particular, cada mínimo se ajustó a una función parabólica. El valor del periodo se determinó mediante una interpolación lineal del orden del mínimo y su posición en el eje de ordenadas, $x = np'$. Este procedimiento se realizó para todas las distancias medidas con la cámara. En la Figura 5 se muestran los datos experimentales obtenidos de la relación periodo de la autoimagen, p' , respecto a la posición z' . Estos datos experimentales se representan mediante estrellas, y se ha hecho una amplificación de una pequeña zona para observar los datos experimentales con detalle. Los datos experimentales se ajustan a una línea recta del tipo $p' = a z' + b$. Para este caso particular el resultado fue $p' = -1,056 z' + 63,83$ (línea continua). En la interpolación lineal también se puede obtener el intervalo de confianza (*PR. Bevington, and D.K. Robinson. Data reduction and error analysis. McGraw-Hill, New York (2003).*), que se ha representado en la Figura 5 mediante dos líneas discontinuas alrededor de la interpolación lineal para el caso de un factor de cobertura de 64% ($k = 1$).

En la Figura 6, se muestra el intervalo de confianza en la medida del periodo de las autoimágenes para la zona donde se realizaron medidas experimentales (líneas discontinuas) y los residuos, R , es decir, la diferencia entre las posiciones experimentales y las obtenidas mediante la interpolación lineal. Se observa que la diferencia máxima de los residuos en este intervalo fue de aproximadamente $\pm 0,15$ micrómetros.

Para determinar la posición del plano principal H , tomamos la interpolación lineal realizada $p' = a z' + b$ y determinamos la posición z' para la cual el periodo de la autoimagen era igual al periodo de la red ($p' = p = 105$ micrómetros). De esta forma, obtuvimos que dicha posición es $-38,97$ milímetros. Para calcular la incertidumbre en el posicionado del plano principal, utilizamos el intervalo de confianza. Para la posición $z' = -38,97$ milímetros, el valor del intervalo de confianza es $0,07$ micrómetros, de forma que el error en el posicionado es $0,066$ milímetros.

Para determinar la posición del plano focal F tomamos el ajuste lineal realizado $p' = a z' + b$, y determinamos la posición z' para la cual el periodo de la autoimagen era $p' = 0$. De esta forma obtuvimos que dicha posición es $+60,41$ milímetros. En este caso, el error en el posicionado resulta $0,065$ milímetros.

Para la determinación de la distancia focal, obtuvimos la distancia entre el plano focal y el plano principal. De esta forma, obtuvimos que $f = HF = + 99,38$ milímetros, con un error de $0,184$ milímetros, calculado mediante propagación de errores.

Para calcular los parámetros ópticos en la cara opuesta de la lente se repitió el proceso una vez dada la vuelta a la lente en el dispositivo, de manera que se intercambiaran las caras de la lente que quedaban próximas a la red de difracción 4 y al sistema de detección 6. Las posiciones resultaron ser $H = -1,7$ milímetros y $F = +97,85$ milímetros, respectivamente. De esta forma, resultó que $f = HF = +99,55$ milímetros con un error de 0,092 milímetros en el posicionado.

Con el cálculo de la distancia focal objeto f o distancia focal imagen f' , obtenidas a partir de las mediciones realizadas en las dos caras de la lente, que idealmente son la misma, $f = f'$, podemos obtener un valor medio que nos indique la distancia focal de la lente. En este caso, resultó ser $f_{\text{medio}} = 99,45$ milímetros. La diferencia de las distancias focales para cada una de las caras fue $-0,09$ milímetros y $+0,09$ milímetros, respectivamente. Este valor experimental es muy parecido al error estimado mediante el factor de cobertura (menor a 0,1 milímetros) lo que corresponde a una incertidumbre de 0,1%, mejorando en un orden de magnitud la incertidumbre que da el fabricante de la lente.

El error en el posicionado de los planos principal y focal se puede obtener a partir de las dos funciones del intervalo de confianza de forma que consideramos el error como $\Delta z = a \times \Delta p'$, donde Δ significa error. Para los datos obtenidos con la gráfica de la Figura 5 se obtiene que $\Delta H = 0,066$ milímetros y $\Delta F = 0,065$ milímetros. Mediante propagación de errores, el error en la distancia focal calculada como $f = HF$, resulta $\Delta f = \sqrt{(\Delta H)^2 + \Delta F^2} = 0,092$ milímetros.

A modo de resumen, en la Tabla 1 se muestran los valores calculados para los distintos parámetros ópticos.

Tabla 1. Resultados obtenidos en el Ejemplo 1.

	f_{nominal} (mm)	H (mm)	F (mm)	f (mm)	f_{medio} (mm)	δf (mm)	Δf (mm)	$\Delta f / f$ (%)
Cara 1	+100	-38,97	60,41	+99,38	+99,45	-0,09	$\pm 0,092$	0,092
Cara 2	+100	-1,7	97,85	+99,55		+0,09	$\pm 0,072$	0,072

Cuando se miden las dos caras (anterior y posterior) del sistema óptico, la distancia focal debe ser la misma en ambos casos, siempre que el índice de refracción en ambos lados sea el mismo. Como mejor parámetro para la distancia focal se puede tomar el valor medio, que en este caso particular resulta $f_{\text{medio}} = +99,45$ milímetros. La diferencia de las distancias focales, δf , para cada una de las caras con respecto a f_{medio} resulta ser $-0,09$ milímetros y $+0,09$ milímetros respectivamente. Este valor es muy similar al obtenido mediante los intervalos de confianza asociados a la interpolación lineal, que resultan ser $\Delta f = \pm 0,092$ milímetros y $\Delta f = \pm 0,072$ milímetros, respectivamente.

De esta forma, se puede concluir que la incertidumbre en la estimación de los parámetros ópticos para este ejemplo, es $\Delta f / f = 0,09\%$ de la distancia focal de la lente.

Ejemplo 2. Medición de los parámetros ópticos de una lente divergente.

Se fabricó un dispositivo para calcular los parámetros ópticos de una lente divergente. Como fuente de iluminación se utilizó un diodo láser pigtaleado a fibra óptica de longitud de onda 670 nanómetros **1**, colimado mediante un elemento colimador **2**.

Se utilizó una red de difracción **4** de amplitud de rendijas de cromo sobre vidrio con un periodo $p = 105$ micrómetros.

La lente cuyos parámetros se querían calcular fue el modelo KPC076 de Newport, que tiene un diámetro de 50,8 milímetros y una distancia focal nominal $f = -100$ milímetros, con una incertidumbre en la distancia focal de ± 1 milímetro (1%).

Como sistema de detección **6** o matriz de fotodetectores, se utilizó una cámara CMOS modelo UI-1492LE de la firma IDS cuyo tamaño de pixel es de 1.67×1.67 micrómetros.

Para el movimiento de la cámara de forma que se pudieran detectar las autoimágenes a distintas distancias de la lente incógnita se utilizó un sistema motorizado, modelo M-500-PS de la firma PI.

Para el tratamiento de los datos recogidos se utilizó un programa informático basado en Matlab sobre un PC, como elemento de procesamiento de datos **7**. También se utilizó este programa informático para sincronizar el movimiento del sistema motorizado con las capturas de imágenes.

Para obtener una posición absoluta en relación a la lente, se aproximó la cámara hasta que llegó a la superficie de la lente en el punto exterior de la misma por el que pasa el eje óptico del sistema, obteniéndose el valor de la constante z_c . De esta forma, se pudo convertir el sistema de coordenadas del sistema motorizado al sistema de referencia de la lente, mediante el valor z_c , sustrayéndolo del valor de z dado por el sistema motorizado. A partir de aquí se movió la cámara a lo largo del eje óptico, separándola de la lente, y se capturó una imagen para cada distancia seleccionada. Para la obtención del perfil de intensidad de la autoimagen se sumaron los píxeles por columnas verticales paralelas a las franjas de la autoimagen. De esta forma, se obtuvo la Figura 7 que muestra la distribución de intensidad capturada por la cámara en diversos planos, en una captura cuasicontinua de planos.

Al igual que en el ejemplo anterior, utilizamos la función variograma para determinar de forma precisa las posiciones de los mínimos de intensidad. Para el perfil de intensidad a cada distancia se obtuvo el variograma y, de este variograma se determinaron los mínimos de intensidad con el objeto de poder medir el periodo de las autoimágenes. Para este caso particular, cada mínimo se ajustó a una función cuadrática. El valor del periodo se determinó mediante una interpolación lineal del orden de los mínimos y la posición del mínimo en las ordenadas, $x = np'$. Este procedimiento se realizó para todas las distancias medidas con la cámara. En la Figura 8, se muestran los datos experimentales obtenidos de la relación periodo de la autoimagen, p' , respecto a la posición z' . Estos datos experimentales se representan mediante estrellas, y se ha hecho una amplificación de una pequeña zona para observar los datos experimentales con detalle. Los datos experimentales se ajustan a una línea recta del tipo $p' = a z' + b$, donde a es la pendiente de la recta y b el término independiente. Para este caso particular, el resultado fue $p' = 1,048 z' + 133,98$ (línea continua). En la interpolación lineal también se puede

obtener el intervalo de confianza, que se ha representado en la Figura 8 mediante dos líneas discontinuas alrededor del ajuste para el caso de un factor de cobertura de 64% ($k = 1$).

- 5 Para determinar la posición del plano principal H, tomamos el ajuste lineal realizado $p' = a z' + b$, y determinamos la posición z' para la cual el periodo de la autoimagen era igual al periodo de la red ($p' = p = 105 \text{ micrómetros}$). De esta forma, obtuvimos que dicha posición es -27,65 milímetros. Para calcular la incertidumbre en el posicionado del plano principal, utilizamos el intervalo de confianza. Para la posición $z' = -27,65$ milímetros, el
10 valor del intervalo de confianza es 0,04 micrómetros, de forma que el error en el posicionado es 0,038 milímetros.

- Para determinar la posición del plano focal F tomamos el ajuste lineal realizado $p' = a z' + b$, y determinamos la posición z' para la cual el periodo de la autoimagen era 0. De esta
15 forma, obtuvimos que dicha posición era -127,81 milímetros, con un error en el posicionado de 0,050 milímetros.

- Para la determinación de la distancia focal, obtuvimos la distancia entre el plano focal y el plano principal. De esta forma, obtuvimos que $f = HF = -100,16$ milímetros.
20

- Para calcular los parámetros ópticos en la cara opuesta de la lente se repitió el proceso una vez dada la vuelta a la lente, intercambiando las caras que quedaban frente a la red de difracción 4 y frente al sistema de detección 6. Las posiciones resultaron ser $H = -17,98$ milímetros y $F = -118,27$ milímetros, respectivamente. De esta forma, resultó que
25 $f = HF = -100,29$ milímetros.

- Con el cálculo de la distancia focal objeto f o distancia focal imagen f' , obtenidas a partir de las mediciones realizadas en las dos caras de la lente, que idealmente son la misma, $f=f'$, podemos obtener un valor medio que nos indique la distancia focal de la lente. En
30 este caso resultó ser $f = -100,23$ milímetros. La diferencia de las distancias focales para cada una de las caras fue -0,07 milímetros y +0,07 milímetros, respectivamente. Este valor experimental es muy parecido al error estimado mediante el factor de cobertura (menor a 0,1 milímetros) lo que corresponde a una incertidumbre de 0,1 %, mejorando en un orden de magnitud la incertidumbre que da el fabricante de la lente.

- 35 El error en el posicionado de los planos principal y focal se puede obtener a partir de las dos funciones del intervalo de confianza de forma que consideramos el error como $\Delta z = a \times \Delta p'$, donde Δ significa error. Para los datos obtenidos con la gráfica de la Figura 8 se obtiene que $\Delta H = 0,038$ milímetros y $\Delta F = 0,050$ milímetros. La incertidumbre propagada
40 para la distancia focal resulta 0,062 milímetros

A modo de resumen, en la Tabla 2 se muestran los valores calculados para los distintos parámetros ópticos.

Tabla 2. Resultados obtenidos en el Ejemplo 2.

	f_{nominal} (mm)	H (mm)	F (mm)	f (mm)	f_{medio} (mm)	δf (mm)	Δf (mm)	$\Delta f / f$ (%)
Cara 1	-100	-27,65	-127,81	-100,16	-100,23	- 0,07	$\pm 0,062$	0,062
Cara 2	-100	-17,98	-118,27	-100,29		+0,07	$\pm 0,064$	0,064

Tomando como mejor parámetro para la distancia focal el valor medio, en este caso resulta $f_{\text{medio}} = -100,23$ milímetros. La diferencia de las distancias focales, δf , para cada una de las caras con respecto a f_{medio} resulta ser -0,07 milímetros y +0,07 milímetros, respectivamente. Este valor es muy similar al obtenido mediante los intervalos de confianza asociados a la interpolación lineal, que resultan ser $\Delta f = \pm 0,062$ milímetros y $\Delta f = \pm 0,064$ milímetros, respectivamente.

- 5 De esta forma, se puede concluir que la incertidumbre en la estimación de los parámetros ópticos para este ejemplo, es $\Delta f = 0,06\%$ de la distancia focal de la lente.
- 10

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo optoelectrónico para determinar los parámetros ópticos de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 que incluye:
5
- una fuente de luz 1;

- un sistema de colimación 2;
10
- una red de difracción 4 de periodo p conocido;

- un sistema de detección 6;

- un dispositivo de desplazamiento 8 para desplazar el sistema de detección 6 a lo largo del eje óptico del dispositivo;
15
- uno o más elementos de procesamiento de datos 7;

donde los distintos elementos están situados en el orden dado, a lo largo del eje óptico del dispositivo, y la lente, sistema de lentes o sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 se sitúa entre la red de difracción 4 y el sistema de detección 6, a lo largo del eje óptico del dispositivo.
20
2. Dispositivo optoelectrónico según la reivindicación 1 en el que la fuente de luz 1 es un láser.
25
3. Dispositivo optoelectrónico según cualquiera de las reivindicaciones 1-2 en el que el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 incluye lentes refractivas y/o difractivas.
30
4. Dispositivo optoelectrónico según cualquiera de las reivindicaciones 1-3 en el que el sistema de detección 6 es una matriz de fotodetectores lineal o bidimensional o
35
5. Dispositivo optoelectrónico según cualquiera de las reivindicaciones 1-4 en el que el dispositivo de desplazamiento 8 es un motor lineal.
35
6. Dispositivo optoelectrónico según cualquiera de las reivindicaciones 1-4 en el que el dispositivo de desplazamiento 8 es un posicionador manual.
40
7. Dispositivo optoelectrónico según cualquiera de las reivindicaciones 1-6 en el que el elemento de tratamiento de datos 7 es un ordenador, una placa procesadora o un microprocesador.
40
8. Método para determinar la posición de uno de los planos principales H o H' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes que incluye los siguientes pasos:
45
a- obtener la constante z_C colocando un sistema de detección 6 en el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, siendo el vértice el punto del eje central de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes por el que pasa el eje óptico del conjunto;
50

b- desplazar el sistema de detección 6 a lo largo del eje óptico, separándolo de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5;

c- capturar un número n de autoimágenes generadas por un haz de luz colimado 3 que atraviesa una red de difracción 4 de periodo p conocido y, a continuación, atraviesa la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 cuyo plano principal H o H' se desea conocer;

d- obtener el perfil de intensidad de cada una de las n autoimágenes mediante integración de la imagen paralelamente a las rendijas de la red de difracción 4;

e- determinar el periodo p' de cada una de las n autoimágenes obtenidas a cada distancia z' entre el sistema de detección 6 y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 más cercano al sistema de detección 6;

f- realizar la interpolación lineal de los datos obtenidos en el paso e-;

g- determinar la distancia z' entre el sistema de detección 6 y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 más cercano al sistema de detección 6, para la que el periodo p' de la autoimagen es igual al periodo p de la red de difracción 4, es decir, $p' = p$, y calcular la incertidumbre dada por la interpolación lineal;

donde $n > 2$

9. Método para determinar la posición de uno de los planos principales H o H' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, según la reivindicación 8, en el que el haz de luz colimado 3 del paso c- es monocromático.

10. Método para determinar la posición de uno de los planos principales H o H' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, según cualquiera de las reivindicaciones 8-9, en el que la determinación del periodo p' del paso e-se realiza mediante la función variograma γ según la ecuación $2\gamma = \langle [I(x+h) - I(x)]^2 \rangle_x$, y una interpolación lineal de los mínimos del variograma: $x = np'$ y una interpolación lineal de los periodos obtenidos en función de la distancia z' , $p' = az' + b$, donde $\langle \rangle$ representa el valor medio, n es el orden de los mínimos del variograma, x es la coordenada paralela a las franjas, I es la señal periódica obtenida y h es la distancia entre píxeles del sistema de detección.

11. Método para determinar la posición de uno de los planos focales F o F' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, que incluye los siguientes pasos:

a- determinar la constante z_c colocando un sistema de detección 6 en el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, siendo el vértice el punto del eje central de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes por el que pasa el eje óptico del conjunto;

b- desplazar el sistema de detección 6 a lo largo del eje óptico, separándolo de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5;

c- capturar un número n de autoimágenes generadas por un haz de luz colimado 3 que atraviesa una red de difracción 4 de periodo p conocido y, a continuación, atraviesa la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 cuyo plano focal F o F' se desea conocer;

d- obtener el perfil de intensidad de cada una de las n autoimágenes mediante integración de la imagen paralelamente a las rendijas de la red de difracción 4;

e- determinar el periodo p' de cada una de las n autoimágenes obtenidas a cada distancia z entre el sistema de detección 6 y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 más cercano al sistema de detección 6;

f- realizar la interpolación lineal de los datos obtenidos en el paso e-;

g- determinar la distancia z' entre el sistema de detección 6 y el vértice de la lente, el sistema de lentes o el sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 más cercano al sistema de detección 6, para la que el periodo p' de la autoimagen es 0, es decir, $p' = 0$, y calcular la incertidumbre dada por la interpolación lineal;

donde $n > 2$.

12. Método para determinar la posición de uno de los planos focales F o F' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, según la reivindicación 11, en el que el haz de luz colimado 3 del paso c- es monocromático.

13. Método para determinar la posición de uno de los planos focales F o F' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5, según cualquiera de las reivindicaciones 11-12, en el que la determinación del periodo p' del paso e- se realiza mediante la función variograma γ según la ecuación $2\gamma = \langle [I(x+h) - I(x)]^2 \rangle_x$, una interpolación lineal de los mínimos del variograma: $x = np'$ y una interpolación lineal de los periodos obtenidos en función de la distancia z' , $p' = az' + b$, donde $\langle \rangle$ representa el valor medio, n es el orden de los mínimos del variograma, x es la coordenada paralela a las franjas, I es la señal periódica obtenida y h es la distancia entre píxeles del sistema de detección.

14. Método para determinar la distancia focal f o f' de una lente, un sistema de lentes o un sistema óptico formador de imágenes incógnita 5 que incluye los siguientes pasos:

a- determinar la posición del plano principal H o H' según cualquiera de las reivindicaciones 7-9;

b- determinar la posición del plano focal F o F' según cualquiera de las reivindicaciones 10-12;

c- determinar la distancia entre el plano principal H o H' obtenido en el paso a- y el plano focal F o F' obtenido en el paso b-, y calcular la incertidumbre como propagación de errores del plano principal y plano focal.

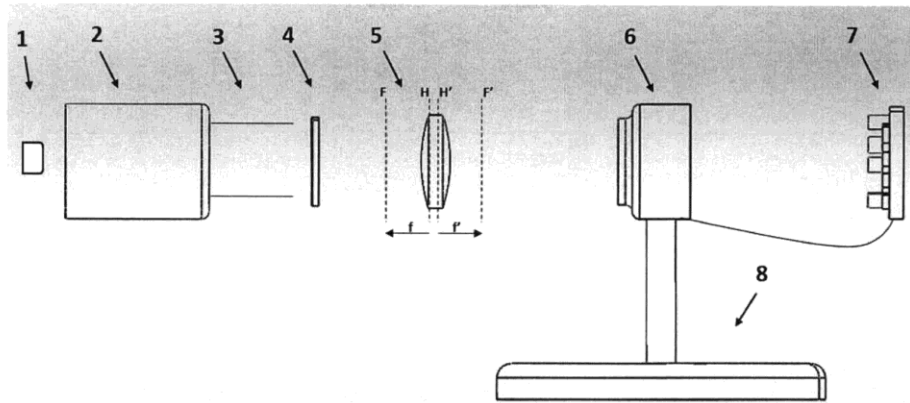


Figura 1

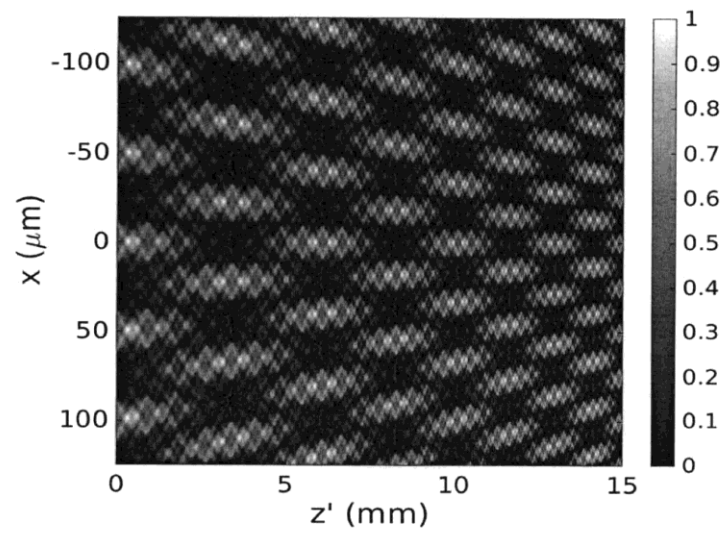


Figura 2

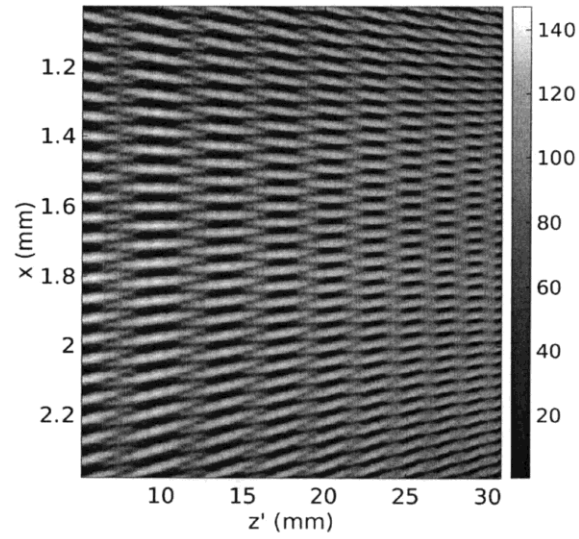


Figura 3

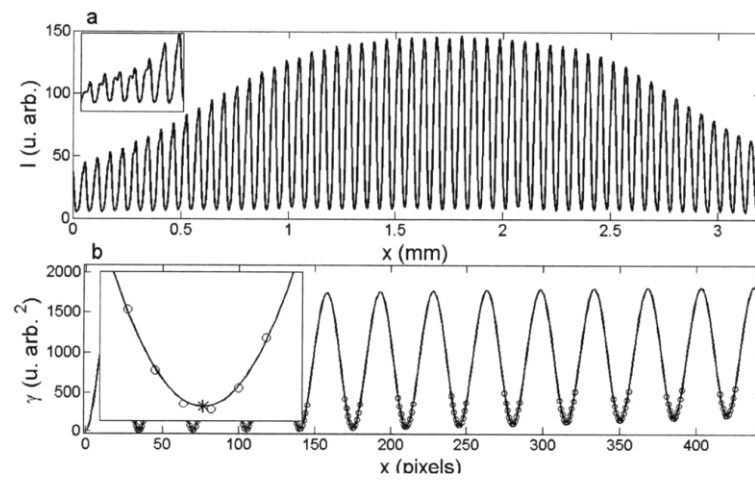


Figura 4

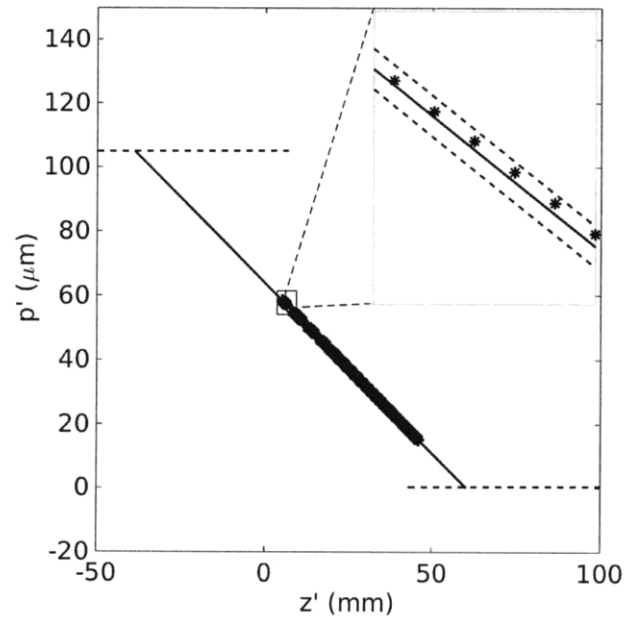


Figura 5

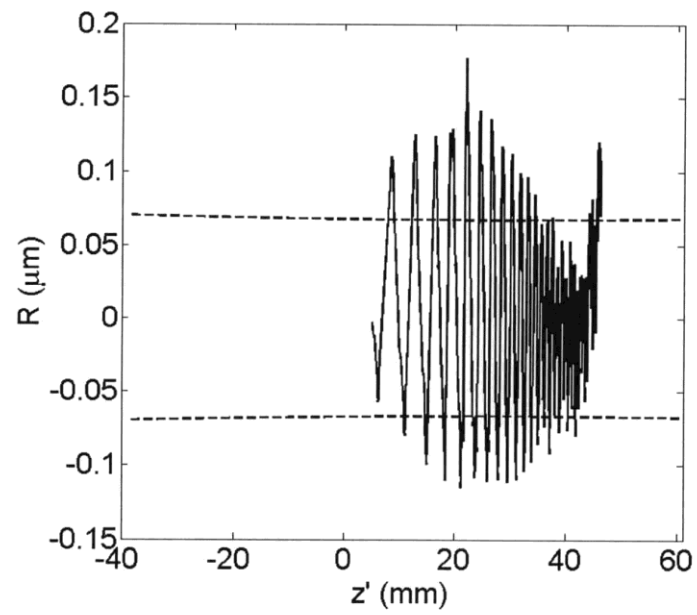


Figura 6

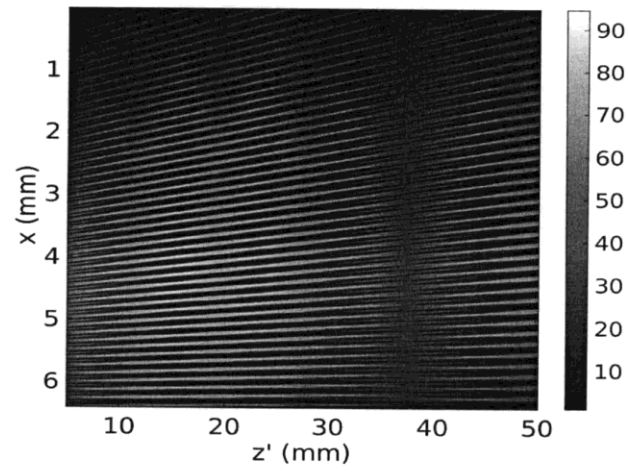


Figura 7

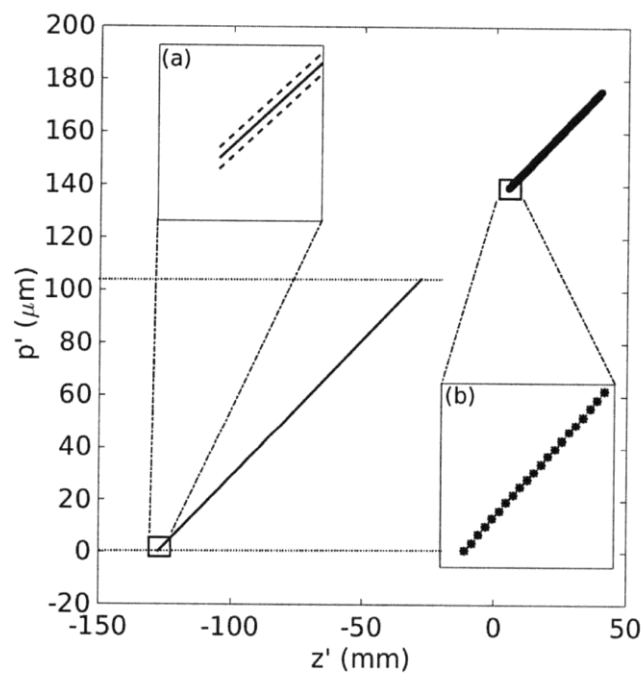


Figura 8



- ②① N.º solicitud: 201600605
②② Fecha de presentación de la solicitud: 21.07.2016
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G01M11/02** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	EP 0418054 A2 (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO.,LTD.) 20.03.1991, resumen; columna 1, líneas 18-50; Columna 2, línea 39 - columna 3, línea 32; figura 1.	1-7, 11, 12
A	EP 2857820 A1 (NIKON CORPORATION) 08.04.2015, resumen; párrafos [0001]-[0002], [0005]-[0013], [0016]-[0052]; Figuras 1-6.	1-7, 11, 12
A	US 2015/0146214 A1 (NAOI, T.) 28.05.2015, resumen; párrafos [0006]-[0008], [0018]-[0039]; figuras 1-4	1-7, 11, 12
A	US 2013/0157202 A1 (KOHARA, N.) 20.06.2013, Todo el documento.	1-14
A	WO 2006/115292 A1 (CANON KABUSHIKI KAISHA) 02.11.2006, Todo el documento.	1-14

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
01.02.2017

Examinador
Ó. González Peñalba

Página
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01M, G02B, G01B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 01.02.2017

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-14	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-14	SI
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	EP 0418054 A2 (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.)	20.03.1991
D02	EP 2857820 A1 (NIKON CORPORATION)	08.04.2015

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se ha considerado, dentro del límite de tiempo establecido al efecto, que la invención definida en las reivindicaciones 1-14 de la presente Solicitud tiene novedad y actividad inventiva por no estar incluida en el estado de la técnica ni poder deducirse de este de un modo evidente por un experto en la materia.

Se han encontrado en el estado de la técnica dispositivos y métodos para el análisis y la evaluación de propiedades ópticas de elementos ópticos incógnita, algunos de ellos basados, como en la presente invención, en una concatenación de componentes sencillos de emisión, colimación, difracción y detección con movilidad entre ellos, pero ninguno con las características estructurales y procedimentales específicas de esta invención. Así, por ejemplo, el documento D01, citado en el Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) con la categoría A, como mero reflejo de los antecedentes existentes en este campo del ensayo óptico, describe un aparato de evaluación de una lente incógnita que, como en la invención, dispone de una fuente de luz coherente (asimilable a un láser) que irradia, tras una etapa de colimación (lentes 5 y 7), sobre una rejilla de difracción previa el elemento óptico en estudio (una lente de proyección 1 –véase, por ejemplo, la columna 2, línea 39–, es decir, un sistema formador de imágenes). Como diferencia, sin embargo, el sistema de D01 necesita de una segunda rejilla de difracción posterior al elemento en estudio y, en consecuencia, sus principios de funcionamiento son esencialmente diferentes, basados en la obtención de franjas de Moiré y orientados al estudio de aberraciones, y su estructura es más compleja.

Un dispositivo y método similares se proponen en el documento D02, también citado en el IET con la categoría A. Se utilizan elementos similares pero, en este caso, la rejilla de difracción se sitúa después del elemento óptico en estudio, precedido por una disposición geométrica de pequeños orificios, para obtener de todo el conjunto un patrón de interferencia que proporcione información del frente de ondas del elemento incógnito. Tampoco este documento reúne las características estructurales específicas del dispositivo de la invención que permiten llevar a cabo los procedimientos de esta, la cual tiene, en conclusión, novedad y actividad inventiva con respecto al estado de la técnica considerado, de acuerdo con los Artículos 6 y 8 de la vigente Ley de Patentes.