



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 325 698**

⑫ Número de solicitud: 200600210

⑬ Int. Cl.:  
**G01J 9/00** (2006.01)

⑭

## PATENTE DE INVENCION

B1

⑮ Fecha de presentación: **20.01.2006**

⑯ Fecha de publicación de la solicitud: **14.09.2009**

Fecha de la concesión: **05.10.2010**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:  
**25.06.2010**

⑰ Fecha de anuncio de la concesión: **19.10.2010**

⑱ Fecha de publicación del folleto de la patente:  
**19.10.2010**

⑲ Titular/es: **Universidad de La Laguna  
c/ Molinos de Agua, s/n  
38207 La Laguna, Tenerife, ES**

⑳ Inventor/es: **Rodríguez Ramos, José Manuel;  
Marichal-Hernández, José Gil y  
Rosa González, Fernando**

㉑ Agente: **Arias Sanz, Juan**

㉒ Título: **Cámara de fase para la medida de distancias y de aberraciones de frente de onda en diversos entornos mediante Slice de Fourier.**

㉓ Resumen:

Cámara de fase para la medida de distancias y de aberraciones de frente de onda en diversos entornos mediante Slice de Fourier.

El sistema aquí propuesto consiste en una cámara de fase formada por microlentes colocadas en el foco de una lente convergente, y cuyos datos, interpretados mediante la técnica combinada de "Slice" de Fourier y de detección de bordes con Transformada Rápida de Fourier, permiten obtener tanto el mapa tridimensional del frente de onda como el mapa de profundidades en escenas reales dentro de un amplio rango de volúmenes.

Esta invención puede ser útil en cualquier área o aplicación en que se requiera conocer el frente de onda: observación astronómica terrestre, oftalmología,... así como en las que se precise metrología: escenas reales, pulido de CCDs, mecánica de automóvil,... Se aplica al caso particular de tomografía de atmósfera en observaciones con ELTs (Telescopios de Gran diámetro: 50 ó 100 metros).

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

## DESCRIPCIÓN

Cámara de fase para la medida de distancias y de aberraciones de frente de onda en diversos entornos mediante Slice de Fourier.

### Objeto de la invención

El sistema aquí propuesto consiste en una cámara de fase formada por microlentes colocadas en el foco de una lente convergente, y cuyos datos, interpretados mediante la técnica combinada de "Slice" de Fourier y de detección de bordes con Transformada Rápida de Fourier, permiten obtener tanto el mapa tridimensional del frente de onda como el mapa de profundidades en escenas reales dentro de un amplio rango de volúmenes.

Esta invención puede ser útil en cualquier área o aplicación en que se requiera conocer el frente de onda: observación astronómica terrestre, oftalmología,... así como en las que se precise metrología: escenas reales, pulido de CCDs, mecánica de automóvil,... Se aplica al caso particular de tomografía de atmósfera en observaciones con ELTs (Telescopios de Gran diámetro: 50 ó 100 metros).

### Sector de la técnica

Óptica. Procesamiento de imágenes.

### Antecedentes de la invención

La presente invención está relacionada tanto con la necesidad de lograr una medida tridimensional del frente de onda asociado a todo problema óptico en que la calidad de imagen sea fundamental (p. ej. para diagnosticar), como con la necesidad de obtener un mapa de profundidades suficientemente fiable y preciso en un amplio rango de volúmenes, desde pocas micras hasta varios kilómetros.

Aunque el planteamiento general puede ser aplicado a otros campos, los análisis llevados a cabo están centrados en telescopios de gran apertura y en medida de profundidades en una escena.

### Estado de la técnica

#### *Tomografía de Atmósfera*

La Óptica Adaptativa, para los presentes telescopios de gran diámetro (GRANTECAN, Keck,...) y futuros telescopios gigantes (50 ó 100 metros de diámetro), ha tomado el rumbo de medir la distribución tridimensional de la fase atmosférica utilizando una forma de tomografía llamada óptica multiconjugada. La ausencia en el cielo de suficiente número de fuentes puntuales naturales, tal que haya siempre alguna presente dentro del campo de visión del objeto observado por el telescopio, obliga a utilizar fuentes puntuales artificiales: estrellas de Na (90 km. de altura).

Para poder corregir toda la atmósfera que afecta al haz de luz proveniente del objeto en el cielo (evitando el anisoplanatismo de foco) es necesario utilizar varias de estas estrellas artificiales (al menos 5). Cada una de ellas, para ser generada, necesita un láser de muy alta resolución, pulsado, y de gran potencia, lo que se traduce en una tecnología enormemente cara. Por otra parte, después de tanto coste, la óptica multiconjugada sólo es capaz de medir la fase atmosférica asociada a, como mucho, tres capas horizontales de turbulencia (con tres sensores de fase midiendo simultáneamente), es decir, barre una proporción diminuta del cilindro tridimensional que afecta a la imagen. Y recuperan una estimación de la fase con cálculos tan complicados que comprometen seriamente la corrección adaptativa del haz óptico dentro del tiempo de estabilidad de la atmósfera en el visible (10 ms).

La técnica que aquí se propone permitirá, sin embargo:

- Ceñirse a una sola medida y a un sólo sensor, dentro de cada tiempo de estabilidad atmosférico.
- Una recuperación de la fase asociada a cada capa horizontal turbulenta, es decir, tomografía de toda la atmósfera, mediante un algoritmo basado en transformada de Fourier, ya de por sí rápido pero que puede ser acelerado con una adaptación inteligente del mismo a Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) o a unidades de hardware electrónico como son las FPGA (Field Programmable Gate Arrays).
- Evitar la necesidad de utilizar estrellas láser artificiales, pues va a recuperar en tiempo real la imagen del objeto a su llegada a la atmósfera terrestre, ya que esta nueva técnica no necesita de calibración con señal puntual para luego de convolucionar.

#### *Tomografía de ojo humano*

El interés principal en realizar tomografía de ojo humano estriba esencialmente en obtener y disponer, por parte de los especialistas médicos, de una imagen nítida del fondo de retina del paciente, para poder realizar los diagnósticos

con mayor fiabilidad. El humor acuoso, el humor vítreo y el cristalino, se comportan en el ojo como medios que aberran la imagen que se puede obtener del fondo de retina.

5 Efectivamente, no exige realizar medidas tan frecuentemente como en la atmósfera terrestre (una cada 10 ms), pues se trata de una deformación estable, sin embargo, sí que exige suficiente resolución tridimensional para, no sólo obtener una buena imagen de fondo de retina, sino también detectar la situación espacial de posibles lesiones oculares.

10 Los pocos autores que, dentro los campos citados, han colocado microlentes en el foco no utilizan la técnica de "Slice" de Fourier ni para realizar la medida de la aberración óptica, ni para corregir la imagen, ni para obtener distancias. Por otro lado, la técnica de "Slice" de Fourier asociada a microlentes en el foco sólo se ha utilizado para obtener fotografías enfocadas de escenas reales en rangos de unos pocos metros cúbicos de volumen, con calidad aparentemente superior a la habitual técnica de profundidad de campo. En definitiva, estas aportaciones de otros autores no tienen nada que ver con la patente que aquí se presenta.

## 15 Descripción de la invención

Una única matriz de microlentes, formando imagen sobre un CCD de suficiente resolución, y colocada en la posición de foco de una lente convergente permite realizar medidas tomográficas del espacio tridimensional objeto.

20 Las medidas se realizan una sola vez, es decir, una única imagen contiene la información suficiente para recuperar el entorno tridimensional. Tal imagen puede ser entendida como compuesta de 4 dimensiones: dos coordenadas sobre el CCD asociadas al interior de cada microlente y otras dos coordenadas asociadas a la matriz de microlentes.

25 La técnica propuesta está basada en el Teorema Generalizado de "Slice" de Fourier. La imagen que toma nuestro CCD es transformada de Fourier en cuatro dimensiones, posteriormente se le aplica un operador de rotación y "slice" que decide la profundidad a la que vamos a recuperar el objeto, y que reduce el problema de 4 dimensiones a sólo 2. Nuestro objetivo es averiguar las profundidades a que están los objetos, por ello, trabajando en el dominio transformado e identificando los objetos con el algoritmo de detección de bordes (altas frecuencias espaciales), podemos identificar los componentes de la escena de los que previamente conocemos a qué distancia están.

30 Por otra parte, un sensor de Shack-Hartmann consiste en un conjunto de lentillas colocadas en forma matricial para formar el mismo número de imágenes en un detector bidimensional. El desplazamiento de cada una de ellas respecto a la posición correspondiente a un frente de onda plano mide el gradiente local del frente de onda. A través de procedimientos numéricos es posible la recuperación del frente de onda original. La cámara de fase propuesta contiene un Shack-Hartmann en el foco de una lente convergente, es por ello que nuestro diseño es también una cámara de fase de frente de onda, pero colocada en el foco de una lente; con un tratamiento de los datos completamente diferente al hasta ahora asociado al sensor Shack-Hartmann. Es entonces posible recuperar tanto profundidades como fases de frente de onda.

## 40 Descripción de las figuras

Figura 1: Esquema de la disposición de la lente de apertura (1), de las lentillas (2), y de la CCD (3) que forman nuestra cámara de fase. (5) es la focal de la lente convergente. (6) es la focal de cada microlente de la matriz de lentillas. (7) es el ángulo de inclinación local del frente de onda. (4) es el desplazamiento en camino óptico que sufre el frente de onda turbulento respecto a otro sin aberrar.

Figura 2: Esquema conceptual de la invención aplicada a un telescopio con un gran espejo principal (1). Realización de tomografía de atmósfera en observación astrofísica de una estrella (8) con óptica adaptativa. Las capas de turbulencia individuales dentro de la atmósfera corresponden a (9) y (10). La cámara de fase permite barrer el cilindro completo de turbulencia atmosférica (13) que afecta a la imagen final del telescopio.

Figura 3: Esquema conceptual de una clásica observación astrofísica de una estrella (8) que utilice óptica adaptativa multiconjugada a dos capas de turbulencia en la atmósfera (9) y (10). Sólo es capaz de recuperar un número muy pequeño de capas de turbulencia individuales (tres capas a lo sumo). (11) y (12) indican los sensores de frente de onda asociados conjuntamente a cada capa turbulenta. (1) se corresponde con el telescopio.

## Ejemplo de un modo de realización de la invención

Se considera el caso particular de una observación astrofísica con un telescopio de diámetro superior al diámetro de coherencia de la atmósfera (aproximadamente 20 cm. en el visible). La turbulencia de la atmósfera provoca pérdida de resolución en la imagen obtenida con el telescopio, es decir, pérdida de la información de altas frecuencias espaciales. Para evitarlo, debe conocerse la forma en que la turbulencia atmosférica degrada el frente de onda de la luz proveniente de la estrella en estudio. Para ello, puede usarse como referencia estrellas puntuales naturales o artificiales que permitan caracterizar la deformación que la atmósfera introduce en el frente de onda.

65 Con óptica adaptativa multiconjugada clásica (Figura 3), un sensor de fase de frente de onda debe ser usado por cada espejo deformable conjugado a una capa de turbulencia individual, es decir dos sensores de fase (WFS) diferentes que deben ser alineados y puestos en funcionamiento paralelamente y en diferentes posiciones del eje óptico. La

## ES 2 325 698 B1

complejidad de los cálculos y la necesidad de velocidad, pues la atmósfera cambia cada 10 milisegundos en el visible, hace actualmente imposible superar la corrección a sólo tres capas de turbulencia atmosférica.

Con la cámara de fase del diseño mostrado en Figura 1, y cuyo funcionamiento en este supuesto se muestra en Figura 2, sólo un sensor es utilizado, colocado en una única posición del eje óptico, y una sola medida, procesada posteriormente mediante la técnica de Slice de Fourier, va a permitir obtener el mapa tridimensional de turbulencias (fases de frente de onda) asociado a toda la columna de atmósfera que afecta a la observación con nuestro telescopio, así como la altura a la que estas capas de turbulencia se encuentran.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Cámara de fase para la obtención en tiempo real del mapa tridimensional de un frente de onda y del mapa de profundidades de una escena que comprende,

una lente convergente,

una matriz de micro lentes colocada en el foco de la lente convergente,

un dispositivo CCD, y

medios de procesamiento adaptados para

- obtener el "focal stack" de la escena aplicando un algoritmo de "Slice" de Fourier, e

- identificar los componentes para cada profundidad del "focal stack" de tal escena mediante un algoritmo de detección de bordes con Transformada Rápida de Fourier.

2. Cámara de fase para la obtención en tiempo real del mapa tridimensional de un frente de onda y del mapa de profundidades de una escena según reivindicación 1, **caracterizada** porque los medios de procesamiento comprenden una unidad GPU.

3. Cámara de fase para la obtención en tiempo real del mapa tridimensional de un frente de onda y del mapa de profundidades de una escena según reivindicación 1 ó 2, **caracterizada** porque los medios de procesamiento comprenden un dispositivo FPGA.

4. Procedimiento para la obtención en tiempo real del mapa tridimensional de un frente de onda y el mapa de profundidades de una escena, que comprende las siguientes etapas:

obtener una imagen de la escena con una cámara de fase según una de las reivindicaciones 1-3;

obtener el "focal stack" del espacio tridimensional aplicando un algoritmo de "Slice" de Fourier; e

identificar los componentes para cada profundidad del "focal stack" de tal escena mediante un algoritmo de detección de bordes con Transformada Rápida de Fourier.

5. Procedimiento para la obtención en tiempo real del mapa tridimensional de un frente de onda y el mapa de profundidades de una escena, según reivindicación 4, aplicado a una observación seleccionada del grupo de: una observación astronómica, una observación oftalmológica, una observación de escenas reales, una observación de pulido de una CCD y una observación de mecánica de automóvil.

Figura 1.-

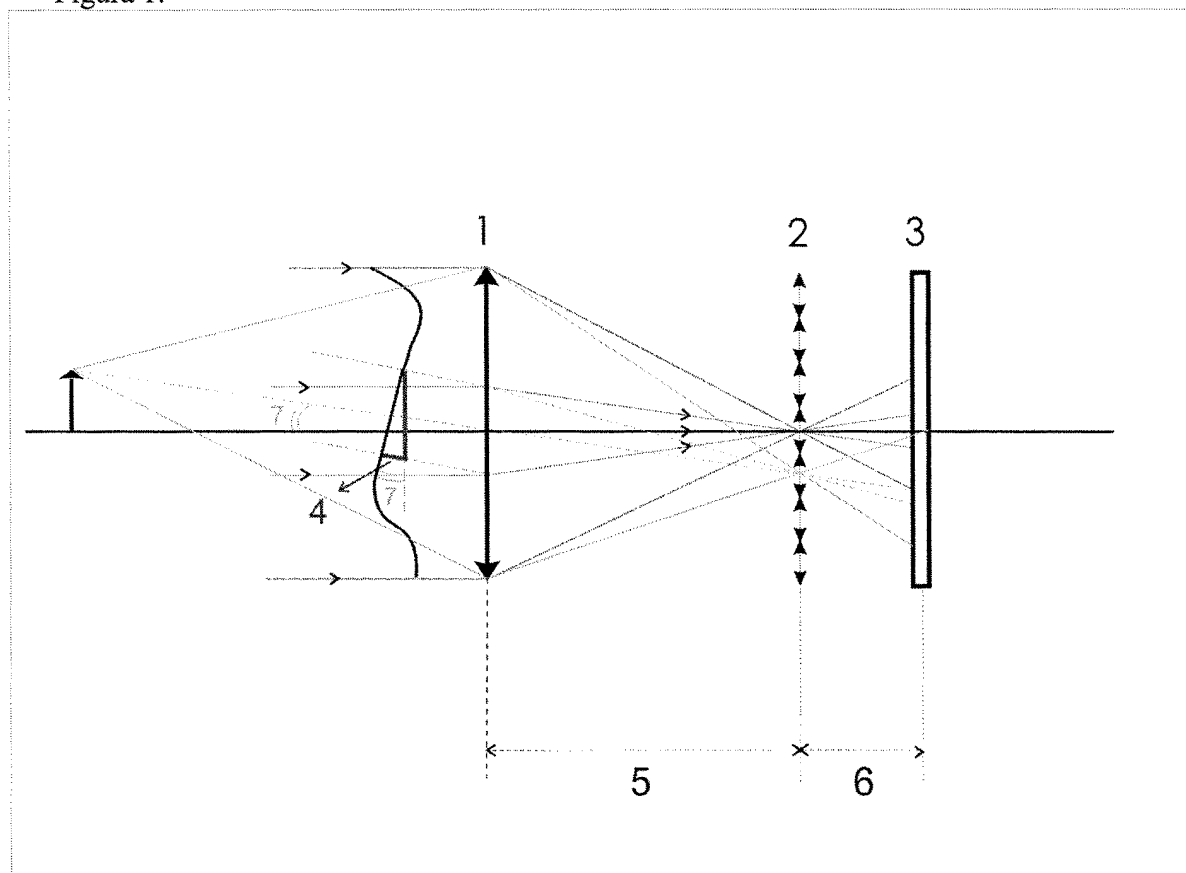


Figura2.-

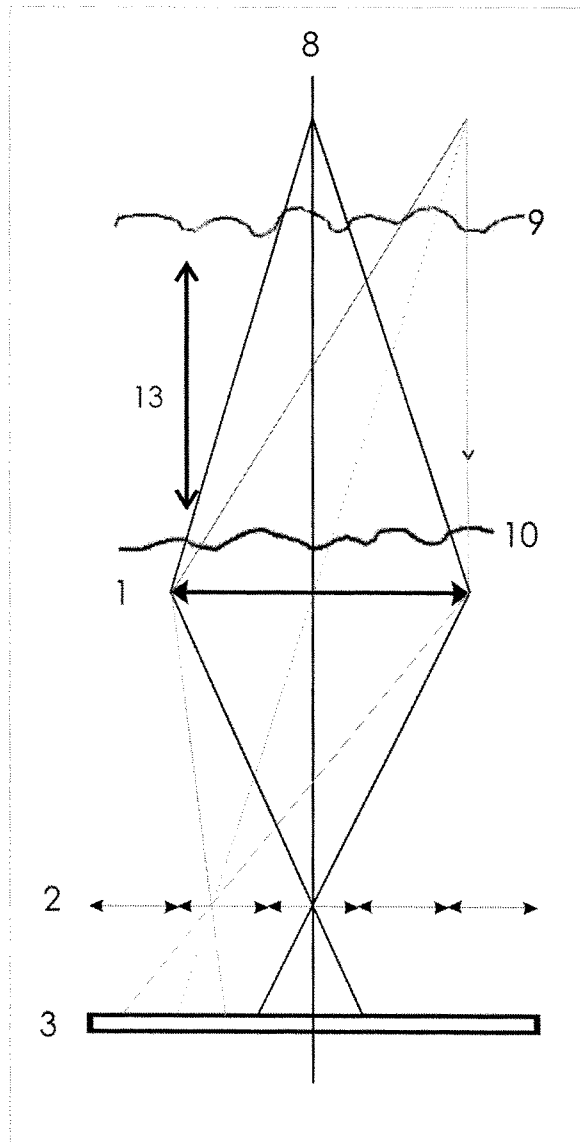
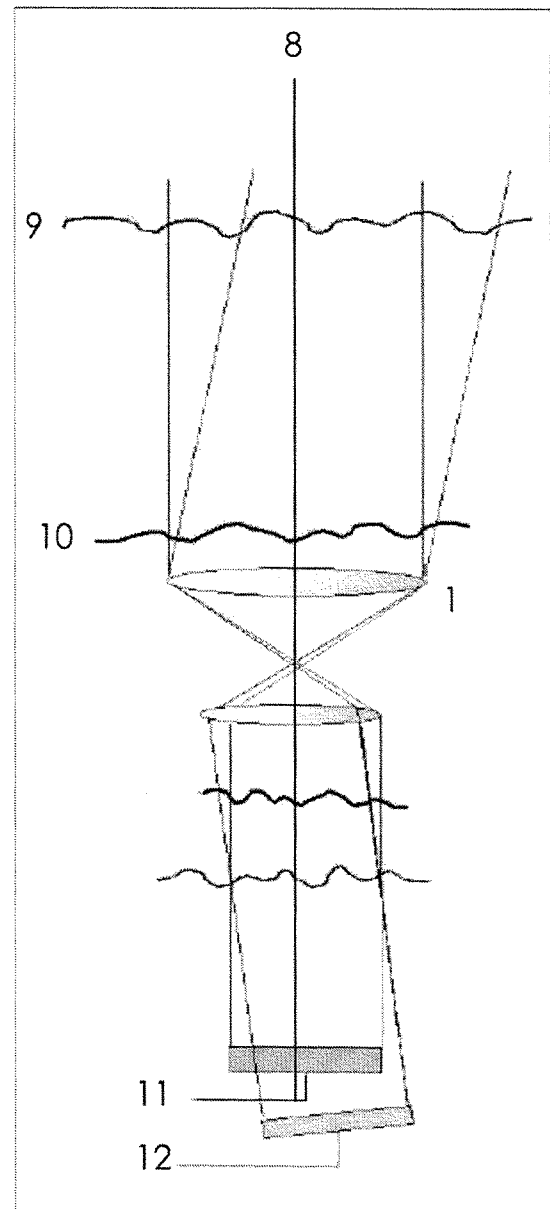


Figura 3.-





OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ ES 2 325 698

⑫ Nº de solicitud: 200600210

⑬ Fecha de presentación de la solicitud: 20.01.2006

⑭ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑮ Int. Cl.: G01J 9/00 (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑯ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	NG, R. et al.: "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera". Stanford University Computer Science Tech Report CTSR, abril de 2005; páginas 1-11, en particular apartados 1 a 3.3.	1-5
Y	NG, R.: "Fourier Slice Photography". ACM Transactions on Graphics, julio de 2005, Vol. 24; páginas 735-744.	1-5
A	ADELSON, E. & WANG, J.: "Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence", Vol. 14, nº 2, febrero de 1992; páginas 99-106.	1
A	WO 9203702 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 05.03.1992, resumen; página 1, línea 1 - página 12, línea 24; figuras.	1
A	ES 2114799 A1 (UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA) 01.06.1998	

#### 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

01.09.2009

Examinador

O. González Peñalba

Página

1/1