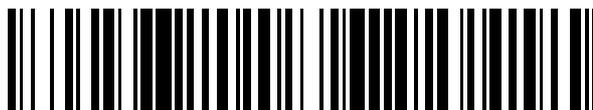


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 525 685**

51 Int. Cl.:

G01J 9/00 (2006.01)

A61B 3/12 (2006.01)

G01J 3/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2006 E 06846018 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.11.2014 EP 1977206**

54 Título: **Sensor de frente de onda secuencial**

30 Prioridad:

20.01.2006 US 335980

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

29.12.2014

73 Titular/es:

**CLARITY MEDICAL SYSTEMS (100.0%)
5775 WEST LAS POSITAS BLVD., SUITE 200
PLEASANTON, CA 94588, US**

72 Inventor/es:

**WEI, SU;
ZHOU, YAN y
ZHAO, QING CHUN**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 525 685 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sensor de frente de onda secuencial

Antecedentes de la invención

5 Los sensores de frente de onda son dispositivos usados para medir la forma del frente de onda de un haz de luz (véase, por ejemplo, el documento US4141652). En la mayoría de los casos, un sensor de frente de onda mide la desviación de un frente de onda respecto a un frente de onda de referencia o un frente de onda ideal tal como un frente de onda plano. Un sensor de frente de onda puede usarse para medir aberraciones tanto de bajo orden como de alto orden de diversos sistemas de imaginología óptica, tales como el ojo humano (véase por ejemplo, los documentos J. Liang, et al. (1994) "Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor", J. Opt. Soc. Am. A 11, 1949-1957; T. Dave (2004) "Wavefront aberrometry Part 1: Current theories and concepts" Optometry Today, 19 de noviembre de 2004, páginas 41-45). Además, un sensor de frente de onda también puede usarse en óptica adaptativa, en la que el frente de onda distorsionado puede medirse y compensarse en tiempo real, usando, por ejemplo, un dispositivo de compensación de frente de onda óptico tal como un espejo deformable. Como resultado de dicha compensación, puede obtenerse una imagen nítida (véase por ejemplo, el documento US5777.719).

Actualmente, la mayoría de los sensores de frente de onda diseñados para medir la aberración del ojo humano son de tipo Shack-Hartmann, en el que el frente de onda medido se divide simultáneamente en un formato paralelo en muchos subfrentes de onda. Los componentes esenciales de dicho sensor incluyen una fuente de luz o haz óptico de entrada, un conjunto de lentes diminutas (llamado conjunto de lenticulos), y una cámara o algún otro medio para registrar el patrón y la ubicación (también llamado centroide) de las imágenes puntuales formadas por el conjunto de lenticulos.

La figura 1 muestra un sensor de Shack-Hartmann de la técnica anterior ejemplar usado para la medición de aberraciones oculares. Un SLD (diodo superluminiscente) 102 se usa generalmente como la fuente de luz y la luz es suministrada a través de los componentes ópticos del ojo (que incluyen la córnea 104 y el cristalino 106) a un área relativamente pequeña en la retina 108. La luz dispersada desde la retina 108 se desplaza a través del sistema de imaginología óptica del ojo (que incluye la córnea 104 y el cristalino 106) y emerge desde la pupila como un frente 110 de onda aberrado. Para suprimir la interferencia de luz reflejada por la córnea 104 y otras interfaces ópticas tales como las del cristalino 106 diferentes de la retina 108, el haz de luz relativamente estrecho de entrada está habitualmente polarizado por un primer polarizador 112 en una primera dirección. Dado que la luz dispersada por la retina está mucho más despolarizada, la luz dispersada por la retina se mide habitualmente en una segunda dirección de polarización ortogonal con un segundo analizador 114 ortogonal.

Puede usarse un sistema de óptica de retransmisión, por ejemplo, 116, que consta de un conjunto de lentes, para ampliar o reducir o simplemente transferir el frente de onda aberrado en un conjunto 118 de lenticulos. Si el conjunto 118 de lenticulos está en un plano conjugado de la pupila (un plano de imagen de la pupila), el frente de onda en el plano del lenticulo será idéntico a o será una versión ampliada o reducida de la forma del frente de onda en la pupila del ojo. El conjunto 118 de lenticulos forma entonces un conjunto de imágenes puntuales en la cámara 120 CCD. Si el ojo fuera un sistema óptico perfecto, el frente de onda en el plano del conjunto de lenticulos sería perfectamente plano (tal como mediante la línea 122 recta de trazos) y un conjunto distribuido uniformemente de puntos de imagen sería registrado por la cámara 120 CCD ubicada en el plano focal del conjunto de lenticulos.

Por otro lado, si el ojo no fuera perfecto, el frente de onda 124 en el conjunto de lenticulos ya no será perfectamente plano y tendrá formas curvas irregulares. En consecuencia, las imágenes puntuales en la cámara 120 CCD se alejarán de la ubicación correspondiente al caso libre de aberraciones. A través del procesamiento de datos de la posición puntual de la imagen en la cámara 120 CCD, pueden determinarse aberraciones del ojo tanto de bajo orden como de alto orden (véase por ejemplo, el documento J. Liang, et al. (1994) "Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wavefront sensor", J. Opt. Soc. Am. A 11, 1949-1957).

Aunque un sensor de frente de onda puede medir la aberración tanto de bajo orden como de alto orden de un sistema de imaginología óptica, para un sistema de imaginología no estática tal como el ojo humano, se ha demostrado que solamente aberraciones de bajo orden correspondientes al error esferocilíndrico medidas a partir de la parte central del ojo son relativamente coherentes (véase por ejemplo, el documento Ginis HS, et al. "Variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using a clinical Shack-Hartmann aberrometer" BMC Ophthalmol. 11 de febrero de 2004; 4: 1.).

En la práctica, para la mayoría de las mediciones y la corrección de una aberración ocular, así como para la mayoría de sistemas ópticos de imaginología del fondo del ojo, las aberraciones ópticas que es necesario medir y corregir son el error esferocilíndrico (también llamado desenfoque (*defocus*) y astigmatismo). Los expertos en la materia conocen bien que estas aberraciones pueden medirse usando un pequeño número de subfrentes de onda alrededor de un anillo anular del frente de onda de entrada. En tal caso, una gran parte de la lectura de los conjuntos de detectores CCD se desperdiciaría. Para ahorrar costes, una serie de (típicamente 8 o 16) detectores cuádruples

pueden disponerse alrededor de un anillo anular de un frente de onda aberrado para realizar la medición de solamente estos subfrentes de onda (véase por ejemplo, la patente de Estados Unidos N° 4.141.652).

Sin embargo, con esta disposición, sigue siendo necesario usar un número múltiple de detectores cuádruples que, aunque colectivamente son menos costosos que una cámara CCD de área grande, no obstante siguen siendo más costosos que un único detector cuádruple. Además, el alineamiento de una serie de detectores cuádruples también será mucho más difícil que el de un único detector cuádruple.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra un sensor de Shack-Hartmann de la técnica anterior ejemplar usado para la medición de aberraciones oculares.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático ejemplar de una realización del sensor de frente de onda secuencial.

La figura 3 muestra el desplazamiento radial y azimutal relativo de un frente de onda duplicado en 4 posiciones simétricas, que corresponde a 4 subfrentes de onda que se selecciona mediante una abertura alrededor de un anillo anular del frente de onda original.

La figura 4 muestra una realización alternativa del sensor de frente de onda secuencial, en la que el haz reflejado es dirigido lateralmente por el espejo de barrido en lugar de ser dirigido inicialmente hacia atrás.

La figura 5 muestra otra realización alternativa del sensor de frente de onda secuencial, en el que se usa un explorador por barrido de haz óptico transmisivo.

La figura 6 muestra otra realización alternativa más del sensor de frente de onda secuencial, en la que una serie de bloques ópticos paralelos de diferente orientación espacial deseada pueden conmutarse secuencialmente en la trayectoria del haz óptico para desplazar el haz transversalmente.

La figura 7 muestra un detector cuádruple con cuatro áreas fotosensibles A, B, C y D, y el punto de imagen en el detector cuádruple para un subfrente de onda incidente normal y un frente de onda incidente no normal.

La figura 8 muestra una serie de casos representativos de enfoque correcto, desenfoque y astigmatismo, el patrón de puntos de imagen asociado en el detector cuádruple detrás de una lente de enfoque de subfrente de onda, así como el movimiento secuencial de las posiciones del centroide correspondientes cuando se muestran en un monitor.

La figura 9 representa un sistema en el que un elemento o módulo óptico de ajuste de foco de alta velocidad es accionado en un modo de control en bucle cerrado por un motor de alta velocidad para mantener al sistema óptico enfocado.

La figura 10 representa un sistema en el que el estado de rotación del rastro del centroide puede usarse como una retroalimentación en un sistema de control en bucle cerrado para hacer girar dos lentes cilíndricas para controlar y corregir astigmatismo.

Descripción detallada de la invención

A continuación se hará referencia en detalle a diversas realizaciones de la invención. En los dibujos adjuntos se ilustran ejemplos de estas realizaciones. Aunque la invención se describirá junto con estas realizaciones, se entenderá que esto no pretende limitar la invención a realización alguna. En la siguiente descripción, se describen numerosos detalles específicos para proporcionar una exhaustiva comprensión de las diversas realizaciones. Sin embargo, la presente invención puede ponerse en práctica sin algunos o todos de estos detalles específicos. En otros casos, operaciones del procedimiento bien conocidas no se han descrito en detalle para no oscurecer innecesariamente la presente invención.

Una realización de la presente invención es un sensor de frente de onda secuencial que comprende un módulo de barrido de haz de luz, una lente de enfoque de subfrente de onda, un detector con más de un área fotosensible y un procesador para calcular los centroides obtenidos secuencialmente del punto luminoso enfocado a partir de los subfrentes de onda para determinar la aberración del frente de onda de entrada. En esta realización de la invención, la lente de enfoque de subfrente de onda y el detector están fijos en el espacio y un barrido de un haz de entrada es realizado por el módulo de barrido de haz de luz para proyectar secuencialmente diferentes partes de frente de onda desde el haz de entrada o una réplica del frente de onda a la lente de enfoque de subfrente de onda y el detector. El procesador puede ser un ordenador o una placa electrónica programable que puede usarse para calcular el rastro o patrón del centroide en un plano x-y.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático ejemplar de una realización del sensor de frente de onda secuencial 200. Un haz de luz de entrada polarizado linealmente que tiene un frente 202 de onda es enfocado por la primera lente 204. El haz de enfoque se desplaza a través de un divisor 206 de haz de polarización (PBS), que está dispuesto de tal manera que su dirección de polarización de paso a través está alineada con la dirección de polarización del haz entrante. Como resultado, el haz convergente polarizado linealmente pasará a través del PBS 206. Una placa 208 de un cuarto de onda está colocada detrás del PBS 206 con el eje rápido orientado de modo que un haz polarizado circularmente emerja después de pasar a través de la placa 208 de un cuarto de onda. Un agujero 210 estenopeico está colocado detrás de la placa 208 de un cuarto de onda y justo en frente del espejo 212 de barrido para servir al propósito de rechazar la luz que no viene directamente del frente de onda de interés del haz de luz.

El haz convergente de entrada, después de pasar a través del agujero 210 estenopeico, es enfocado sobre la superficie reflectante de un espejo 212 de barrido inclinado, que está montado sobre un árbol 214 del motor. El haz de luz reflejado por el espejo es divergente, con su rayo principal central del haz cambiado a una dirección que depende del ángulo de inclinación del espejo 212 de barrido y la posición rotacional del motor 214. Se espera que el haz reflejado siga estando polarizado circularmente, pero la dirección de rotación de polarización circular se cambiará de izquierda a derecha o de derecha a izquierda. Por lo tanto, en el momento de pasar a través de la placa 208 de un cuarto de onda una segunda vez en su trayectoria de retorno, el haz se vuelve polarizado linealmente de nuevo, pero con su dirección de polarización girada a una dirección ortogonal con respecto a la del haz entrante original. Por lo tanto, en el divisor 206 de haz de polarización, el haz retornado será reflejado en su mayoría a la izquierda como se muestra mediante los rayos de luz punteados en la figura 2.

Una segunda lente 216 se coloca a la izquierda a continuación del PBS 206 para colimar el haz divergente reflejado y para producir una réplica del frente de onda de entrada original. Debido a la inclinación del espejo de barrido, el frente de onda duplicado es desplazado transversalmente. Una abertura 218 se coloca detrás de la segunda lente 216 y justo en frente de la lente 220 de enfoque de subfrente de onda para seleccionar una pequeña parte del frente de onda duplicado. La lente 220 de enfoque de subfrente de onda enfoca el subfrente de onda seleccionado sobre un dispositivo 222 de detección de la posición, que se usa para determinar el centroide del punto luminoso enfocado generado a partir de los subfrentes de onda seleccionados secuencialmente. Haciendo girar al motor 214 y cambiando el ángulo de inclinación del espejo 212 de barrido de forma gradual, la cantidad de desplazamiento radial y azimutal del frente de onda duplicado puede estar controlada de modo que cualquier parte del frente de onda duplicado pueda seleccionarse para pasar a través de la abertura 218 de manera secuencial. Como resultado, el frente de onda global del haz entrante original puede caracterizarse para el caso de un sensor de frente de onda de Hartmann-Shack convencional con la excepción de que el centroide de cada subfrente de onda se obtiene ahora de manera secuencial en lugar de paralela.

En otra realización, el ángulo de inclinación del espejo de barrido es fijo y el motor se hace girar en múltiples pasos de forma continua. Como resultado, solamente un número seleccionado de subfrentes de onda alrededor de un anillo anular del frente de onda se seleccionará y caracterizará. Este modo de barrido es extremadamente útil para determinar el error esferocilíndrico o desenfoque y astigmatismo del frente de onda original, como se ha descrito en la sección de antecedentes. La figura 3 muestra el desplazamiento radial y azimutal, con respecto a la abertura 310, de los frentes (302,304, 306 y 308) de onda duplicados en 4 posiciones de parada del motor simétricas de cada revolución, lo que corresponde a 4 subfrentes (312, 314, 316, 318) de onda que son seleccionados por la abertura 310 alrededor de un anillo 320 anular del frente de onda original.

Se entiende que, sin alejarse del alcance de la presente invención, puede haber muchas variaciones en términos de componentes usados. Por ejemplo, la placa de un cuarto de onda puede ser una placa de un cuarto de onda no de orden cero y puede ser sustituida por un rotador de Faraday que puede hacer girar la dirección de polarización de un haz retornado a una dirección ortogonal. Mientras tanto, el haz de entrada no tiene que estar polarizado linealmente y no es necesario que el divisor de haz esté limitado a un divisor de haz de polarización. Puede usarse un divisor de haz óptico ordinario y, en tal caso, la placa de un cuarto de onda o el rotador de Faraday puede eliminarse. Aunque la eficiencia de la potencia óptica del detector se reducirá, esto puede no afectar necesariamente al rendimiento del sensor de frente de onda, siempre que haya superficie potencia óptica suministrada al detector.

El dispositivo de detección de la posición (PSD) es un sensor usado para medir el centroide de un punto luminoso a diversos tamaños. El dispositivo de detección de la posición podría ser, aunque sin limitarse a, un detector cuádruple, sensor PSD o un detector que tenga múltiples áreas fotosensibles tales como un conjunto de detectores 2D de área pequeña. Dichos detectores incluyen el detector de área CCD y el detector de área CMOS. Una abertura es necesaria y el propósito de la abertura es seleccionar una pequeña parte del frente de onda para enfocar sobre el detector cuando la lente de enfoque de subfrente de onda usada detrás de la abertura es relativamente grande. La abertura no está necesariamente limitada a la configuración de tamaño fijo. Una abertura de tamaño variable permite la selección de sensibilidad y resolución durante su funcionamiento.

Además, la lente de enfoque de subfrente de onda puede sustituirse por cualquier elemento óptico que pueda conseguir la función de enfocar, por ejemplo, también puede usarse una lente de índice gradual o un espejo de enfoque. Tampoco es necesario que el número de paradas para cada revolución del motor esté limitado a 4 y puede ser cualquier número. Mientras tanto, se puede hacer girar al motor de forma continua y la fuente de luz puede ser de pulsos cortos para encenderla en momentos diferentes. El ángulo de inclinación del espejo de barrido también puede cambiarse de forma dinámica en tiempo real de modo que puedan seleccionarse diferentes partes del anillo anular del frente de onda. De hecho, aunque se usó la expresión "espejo inclinado", debe observarse que la expresión también incluye el caso de ángulo de inclinación cero del espejo, es decir, el haz de entrada es normal al espejo de modo que el haz reflejado sea coaxial con respecto al haz de entrada, puesto que dirigirá la parte central del frente de onda original al detector.

El orden de secuencia de rotación del motor e inclinación del espejo de barrido también puede invertirse o mezclarse, de modo que la selección de subfrentes de onda pueda ser en cualquier secuencia deseada. Además, el espejo de barrido y el motor pueden sustituirse, aunque sin limitarse a, por un espejo MEMS (sistema microelectromecánico), que actualmente está siendo comercializado, o cualquier otro espejo deformable siempre

que pueda cambiar la dirección del haz de luz reflejado. La ventaja de usar un espejo MEMS es que tiene una respuesta de frecuencia relativamente alta debido al bajo peso de la masa del espejo móvil, como resultado, puede conseguirse detección del frente de onda secuencial de alta velocidad. Además, el ángulo de inclinación del espejo MEMS puede controlarse fácilmente.

- 5 Se entiende que, sin alejarse del alcance de la presente invención, también puede haber muchas variaciones en términos de configuración del sistema. Por ejemplo, no es necesario en absoluto reflejar el frente de onda hacia atrás en primer lugar y a continuación desviar el haz a un lado.

10 Como una alternativa, el espejo de barrido también puede sustituirse por un espejo 412 de tambor multifacetado no convencional con cada superficie reflectante teniendo una orientación espacial deseada de modo que, cuando cada superficie reflectante se hace girar en posición de manera gradual o continua, el haz de entrada convergente es reflejado con el rayo principal central trazando un rastro alrededor de un cono. La figura 4 muestra una vista de sección transversal esquemática de dicha configuración 400, en la que el haz reflejado está desplazado transversalmente hacia arriba. Debe observarse que el haz reflejado también puede estar desplazado hacia abajo, a izquierda o derecha, o a cualquier dirección azimutal con cualquier cantidad de desplazamiento radial. Esto es debido a que el tambor 412 multifacetado no es un polígono simétrico, cuando cada superficie se mueve de posición para reflejar el haz convergente de entrada, reflejará el haz a una dirección espacial diferente de modo que una parte deseada del frente de onda duplicado se seleccione mediante la abertura para enfocar sobre el detector.

15 Adicionalmente, un agujero estenopeico puede disponerse de nuevo antes el espejo multifacetado a lo largo de la trayectoria de la luz de entrada para rechazar la luz que no procede de la dirección o ubicación deseada del haz de entrada. Nótese que la misma configuración puede realizarse usando un espejo MEMS para sustituir al espejo multifacetado lo que ofrecerá todas las ventajas como se ha mencionado anteriormente. Nótese también que el espejo de tambor multifacetado puede tener una disposición de orientación de las facetas de modo que, cuando el tambor gira en múltiples etapas de forma continua, una serie de subfrentes de onda alrededor de un anillo anular del frente de onda se seleccionan para enfocar sobre el detector.

20 Como otra alternativa, el sistema también puede estar configurado en un modo completamente transmisivo en lugar de un modo reflectivo. La figura 5 muestra dicha configuración en la que el espejo de tambor multifacetado se sustituye por el explorador 512a y 512b por barrido de haz óptico transmisivo. Existen una serie de exploradores por barrido de haz óptico transmisivos diferentes disponibles en el mercado actualmente, los ejemplos incluyen modulador acústico-óptico, explorador por barrido de haz electro-óptico o magneto-óptico y explorador por barrido de haz de cristal líquido, que se representan mediante 512a. En tal caso, el explorador por barrido de haz debe ser capaz de realizar un barrido del haz, enfocado o no enfocado dependiendo del lado de la ventana del explorador por barrido transmisivo, bidimensionalmente para dirigir secuencialmente una serie de partes deseadas del frente de onda para caracterización.

25 Como alternativa, también puede usarse un disco 512b de múltiples secciones de cuña para dicho propósito. Se entiende que, como se ha descrito para el espejo de tambor multifacetado en el caso reflectante, el disco 512b de múltiples secciones de cuña para el caso transmisivo debe ser también un disco no simétrico en el sentido de que, cuando una sección de cuña se hace girar en posición para desviar el haz enfocado o no enfocado, el ángulo de la cuña determinará la dirección del haz emergente y, por lo tanto, la parte del frente de onda que será seleccionada por la abertura 518b. Cada sección de cuña debe tener una diferente orientación del ángulo de la cuña para permitir que una secuencia de subfrentes de onda deseados sea caracterizada. Nótese que si la ventana del explorador por barrido transmisivo es pequeña, es necesario que el haz de entrada esté enfocado en la ubicación del explorador por barrido transmisivo y, en tal caso, debe usarse una primera lente para enfocar el haz óptico de entrada y debe usarse una segunda lente para colimar el haz transmitido para producir una réplica del frente de onda de entrada que esté desplazada transversalmente en el espacio.

30 En otra realización de la presente invención, el concepto de desplazar secuencialmente el frente de onda del haz de entrada transversalmente se amplía adicionalmente para incluir el caso de desplazamiento transversal directo del haz de entrada, en el que el haz de entrada no se enfoca y a continuación se colima de nuevo. En su lugar, el haz de entrada es dirigido desplazado transversalmente para dirigir una parte deseada del frente de onda a la abertura (618a, 618b). La ventaja de dicho esquema es que se necesitarán menos elementos ópticos y, por lo tanto, el módulo de barrido de luz puede simplificarse mucho. La figura 6 muestra dicho ejemplo en el que una serie de bloques (612a, 612b) ópticos paralelos de diferente orientación espacial deseada pueden conmutarse secuencialmente en la trayectoria del haz óptico para desplazar transversalmente el haz.

35 Como alternativa, el explorador por barrido de haz óptico transmisivo puede ser un polígono transmisivo multifacetado al que se le puede hacer girar por etapas para interceptar la trayectoria del haz óptico para desplazar transversalmente de forma secuencial el haz. Nótese también que el desplazamiento transversal de un haz óptico no tiene que conseguirse necesariamente por medios mecánicos. Por ejemplo, una célula de cristal líquido, una célula electro-óptica y una célula magneto-óptica pueden usarse todas con el fin del desplazamiento transversal del haz, en cuyo caso, el cambio del índice de refracción efectivo de la célula cambiará la cantidad de desplazamiento transversal del haz. Como en el caso del explorador por barrido de haz óptico reflectante, el explorador por barrido de haz óptico transmisivo puede fabricarse para permitir que una serie de subfrentes de onda alrededor de un anillo

anular del frente de onda se seleccionen para enfocar sobre el detector para detectar una aberración de desenfoque y astigmatismo.

5 El sensor de frente de onda descrito anteriormente puede usarse para un gran número de aplicaciones. Una primera aplicación fundamental es en óptica adaptativa en la que el frente de onda distorsionado medido puede compensarse en tiempo real usando un dispositivo de compensación de frente de onda, tal como un conjunto de espejos deformables. En tal caso, es necesario que la velocidad para realizar el barrido del haz sea relativamente alta y, por lo tanto, deben usarse preferentemente exploradores por barrido o desplazadores de haz de alta velocidad tales como un espejo MEMS y células electro-ópticas o magneto-ópticas.

10 Una segunda aplicación fundamental de las realizaciones descritas anteriormente es en autoenfoque y/o corrección del astigmatismo. Debido al hecho de que solamente es necesario caracterizar un pequeño número (por ejemplo, 8) de subfrentes de onda alrededor de un anillo anular para deducir el desenfoque y astigmatismo de un sistema de imaginología, tal como el de un ojo humano, no es necesario que el módulo de barrido de haz óptico tenga una respuesta de frecuencia muy alta y, por consiguiente, exploradores por barrido de haz de bajo coste tales como un espejo inclinado montado sobre un motor paso a paso, como se muestra en la figura 4, serán suficientes. Por ejemplo, el sensor de frente de onda descrito anteriormente puede usarse en una cámara del fondo del ojo para corrección del desenfoque y/o el astigmatismo en tiempo real de un sistema de imaginología del ojo, como se describe en los documentos US6361167 y US6685317 de modo que pueda obtenerse una imagen del fondo del ojo de alta resolución.

20 Otra característica del sensor de frente de onda descrito anteriormente es que, cuando se aplica a la caracterización de solamente desenfoque y/o astigmatismo, un detector cuádruple será suficiente y su salida puede procesarse para producir un rastro o patrón secuencial que puede visualizarse en un monitor para indicar en tiempo real, si el sistema de imaginología óptica en frente del sensor de frente de onda está en el foco o no, lo alejado que está el foco, si el desenfoque es convergente o divergente, la cantidad de astigmatismo, así como el eje de astigmatismo.

25 Supongamos un detector 702 cuádruple con cuatro áreas fotosensibles A, B, C y D, como se muestra en la figura 7. Si el subfrente de onda es incidente a un ángulo normal con respecto a la lente de enfoque de subfrente de onda en frente del detector cuádruple, el punto 704 de imagen en el detector cuádruple estará en el centro y las cuatro áreas fotosensibles recibirán la misma cantidad de luz, con cada área produciendo una señal de la misma intensidad. Por otro lado, si el subfrente de onda se aleja de la incidencia normal con un ángulo de inclinación (digamos, apuntando hacia la dirección superior derecha), el punto de imagen en el detector cuádruple se formará entonces lejos del centro (desplazado hacia el cuadrante superior derecho, como se muestra mediante el punto 706 de imagen). La desviación (x, y) del centroide respecto al centro (x=0, y=0) puede caracterizarse usando la siguiente ecuación:

$$x = \frac{(B + C) - (A + D)}{A + B + C + D} \quad (1)$$

$$y = \frac{(A + B) - (C + D)}{A + B + C + D}$$

35 donde A, B, C y D representan la intensidad de señal de cada área fotosensible correspondiente del detector cuádruple y el denominador (A+B+C+D) se usa para normalizar la medición de modo que el efecto de la fluctuación de intensidad de la fuente óptica pueda cancelarse.

40 Cuando un número de subfrentes de onda simétricos (por ejemplo, 4, 8 o 16) alrededor de un anillo anular de un haz óptico se proyecta secuencialmente (por ejemplo, en una dirección en sentido de las agujas del reloj) sobre la lente de enfoque de subfrente de onda y el detector cuádruple, la desviación del centroide como se indica mediante (x, y) de la ecuación (1) respecto al centro del detector cuádruple trazará un patrón en un plano x-y que puede visualizarse en un monitor y también procesarse digitalmente para representar el estado de desenfoque y astigmatismo.

45 La figura 8 muestra una serie de casos representativos de enfoque correcto, desenfoque y astigmatismo, el patrón de puntos de imagen asociado en el detector cuádruple detrás de la lente de enfoque de subfrente de onda, así como el movimiento secuencial de las posiciones del centroide correspondientes cuando se visualizan en un monitor. Nótese que en lugar de dibujar un número de frentes de onda que son proyectados con diferentes subfrentes de onda sobre la misma lente de enfoque de subfrente de onda y detector cuádruple, se ha tomado la representación equivalente como se muestra en la figura 3, en la que un número de subfrentes de onda se dibujan alrededor del mismo anillo anular y, por consiguiente, un número de detectores cuádruples se dibujan alrededor del mismo anillo anular para representar el caso de realizar un barrido de diferentes partes de un frente de onda para una lente de enfoque de subfrente de onda y un único detector cuádruple.

50 Supongamos que el barrido comienza alrededor del anillo anular del frente de onda desde el subfrente de onda superior y se mueve en una dirección en sentido de las agujas del reloj hasta el segundo subfrente de onda a la derecha y así sucesivamente, como se indica mediante la flecha 809. Puede verse a partir de la figura 8 que, cuando

el frente de onda es una onda plana 801, lo que significa que el sistema óptico está enfocado correctamente sin ninguna aberración, todos los subfrentes de onda (por ejemplo, 802) formarán un punto 803 de imagen en el centro del detector 804 cuádruple y como resultado, el rastro 805 del centroide en un monitor 806 también estará siempre en el centro del plano x-y. Por lo tanto, y todo en el patrón o rastro del centroide en el centro del plano x-y puede usarse para indicar el estado de enfoque correcto.

Sin embargo, para un caso más general, siempre puede haber alguna aberración del frente de onda de entrada que alejará algo al centroide del centro del plano x-y, como el caso de astigmatismo, como se describirá brevemente. Por lo tanto, con la presencia de otras aberraciones, la minimización de la dispersión de los centroides respecto al centro del plano x-y puede usarse como un criterio para autoenfoco o enfoque asistido. En tal caso, la dispersión de los centroides puede definirse como una suma de la distancia absoluta de cada centroide respecto a un centro común y esta señal puede usarse como señal de retroalimentación en un sistema de control en bucle cerrado para autoenfoco.

Cuando el frente de onda de entrada es divergente, como se muestra mediante 811, el centro del punto 813 de imagen cada subfrente 812 de onda estará en el lado radialmente hacia fuera respecto al centro del frente de onda con una cantidad igual de desviación del centro del detector 814 cuádruple, y como resultado, el rastro 815 en el monitor 816 será un círculo en sentido de las agujas del reloj, como se indica mediante la flecha 818 comenzando desde la posición 817 superior. Si, por otro lado, el frente de onda de entrada es convergente, como se muestra mediante 821, el centro del punto 823 de imagen de cada subfrente 822 de onda estará en el lado radialmente hacia dentro con respecto al centro del frente de onda con una cantidad igual de desviación desde el centro del detector 824 cuádruple, como resultado, el rastro 825 del centroide en el monitor 826 seguirá siendo un círculo pero comenzará a partir de la posición 827 inferior y seguirá siendo en sentido de las agujas del reloj, como se indica mediante la flecha 828. Por lo tanto, cuando se detecta un cambio de signo para tanto la posición del centroide en el eje x como la posición del centroide en el eje y, esto es una indicación de que el frente de onda de entrada está cambiando desde un haz divergente hasta un haz convergente o al revés. Además, el punto de partida del rastro del centroide también puede usarse como criterio para indicar si el frente de onda de entrada es divergente o convergente.

Este criterio de cambio de signo o de cambio de punto de partida puede usarse, por lo tanto, como retroalimentación para indicar si el sistema óptico en frente del sensor de frente de onda está enfocado correctamente o no. En la práctica, puede haber otras aberraciones de frente de onda presentes y, por lo tanto, un cambio de signo para toda la posición del centroide puede no ocurrir al mismo tiempo. Una práctica preferida podría ser definir una cantidad crítica de ajuste de foco en el sistema óptico en frente del sensor de frente de onda de modo que, si dentro del intervalo de ajuste de foco preestablecido, todos o la mayoría de los signos del centroide han cambiado, entonces el frente de onda puede considerarse como enfocado. En una realización de la presente invención, este cambio de signo puede usarse, por lo tanto, como criterio para autoenfoco o enfoque asistido, en el que, un elemento o módulo óptico de ajuste de foco de alta velocidad tal como una lente móvil accionada axialmente en un modo de control de bucle cerrado por un motor de alta velocidad puede disponerse en el sistema óptico en frente del sensor de frente de onda para mantener al sistema óptico siempre enfocado bloqueando el sistema en el punto de cambio de signo. Como alternativa, otros tipos de lentes de enfoque ajustable, tal como una lente de tensión superficial líquida, una lente de cristal líquido o una lente acústico-óptica también pueden usarse para el mismo propósito.

Para el caso de un frente de onda de entrada esférico tanto divergente como convergente, la dirección de rotación del rastro del centroide secuencial en el plano x-y es la misma que la dirección de barrido de los subfrentes de onda alrededor del anillo anular del frente de onda de entrada. En esta realización de la invención, se define esta misma dirección de rotación como normal. Como se describirá brevemente, para el caso de un frente de onda de entrada astigmático, puede ocurrir que la dirección de rotación del rastro del centroide secuencial en el plano x-y sea la opuesta en comparación con la dirección de barrido de los subfrentes de onda alrededor del anillo anular del frente de onda de entrada, esta dirección de rotación opuesta se define como anormal.

Para los casos de rotación del rastro del centroide normal en el plano x-y, si el rastro es circular, el diámetro del rastro (815, 825) circular puede usarse obviamente para indicar el grado de desenfoque. En la práctica, dado que siempre puede haber algunas otras aberraciones y, por lo tanto, el rastro del centroide puede no ser perfectamente circular, una buena práctica podría ser ajustar el rastro del centroide a un círculo y a continuación derivar un diámetro o radio promediado del rastro. En una realización de la presente invención, el criterio de consecución de un diámetro o radio promediado mínimo de un rastro del centroide se usa para enfoque asistido o autoenfoco, en el que, un elemento o módulo óptico de ajuste de foco de alta velocidad tal como una lente (930) móvil accionada axialmente en un modo de control en bucle cerrado por un motor de alta velocidad puede disponerse en el sistema óptico en frente del sensor de frente de onda para mantener el sistema óptico siempre enfocado, como se muestra en la figura 9. Como alternativa, una lente de enfoque ajustable tal como una lente de tensión superficial líquida, una lente de cristal líquido o una lente acústico-óptica también pueden usarse para el mismo propósito.

También puede verse a partir de la figura 8 que, cuando el frente de onda de entrada es astigmático, puede ocurrir que cuando el frente de onda de entrada está aproximadamente enfocado, el frente de onda puede ser divergente en dirección vertical, como se muestra mediante 831a, y convergente en dirección horizontal, como se muestra mediante 831b, como resultado, la posición del centroide de los subfrentes 833a de onda verticales estará ubicada

radialmente hacia fuera con respecto al centro del frente de onda de entrada, y la posición del centroide de los subfrentes 833b de onda horizontales estará ubicada radialmente hacia dentro con respecto al centro del frente de onda de entrada. En consecuencia, el rastro 835 del centroide en el monitor 836 comenzará a partir de la posición 837 superior pero se moverá en sentido contrario a las agujas del reloj, como se indica mediante la flecha 838, por lo tanto la rotación del rastro del centroide es ahora anormal. Nótese que, cuando se dice que el frente de onda astigmático está aproximadamente enfocado, se quiere decir que a lo largo de un eje del frente de onda astigmático, los subfrentes de onda son divergentes, y a lo largo del otro eje del frente de onda astigmático, los subfrentes de onda son convergentes. En una realización de la presente invención, esta dirección de rotación anormal del rastro del centroide puede usarse para indicar, en primer lugar, que el frente de onda de entrada es astigmático y, en segundo lugar, para indicar que el frente de onda astigmático está aproximadamente enfocado. La circularidad del rastro del centroide anormal también puede usarse para indicar que el frente de onda de entrada astigmático está o no en un enfoque relativamente correcto.

Por otro lado, si el frente de onda de entrada es astigmático pero todos los subfrentes de onda son completamente divergentes o completamente convergentes, la rotación del rastro del centroide será en el sentido de las agujas del reloj (es decir normal) en base a un argumento similar como se ha hecho para el frente de onda desenfocado divergente y convergente, sin embargo, para el caso astigmático, el rastro del centroide en el monitor será elíptico en lugar de circular, dado que los subfrentes de onda a lo largo de un eje astigmático serán más divergentes o convergentes que aquellos a lo largo del otro eje. Para un frente de onda astigmático más general, el rastro del centroide girará en una dirección anormal con el rastro elíptico o circular, o el rastro del centroide girará en la dirección de rotación normal pero el rastro será elíptico. El eje de la elipsis puede estar en cualquier dirección radial con respecto al centro del frente de onda, lo que indicará el eje del astigmatismo. En tal caso, 4 subfrentes de onda alrededor de un anillo anular pueden no ser suficientes y más subfrentes de onda (tales como 8 o 16 en lugar de 4) pueden proyectarse sobre la lente de enfoque de subfrente de onda y el detector cuádruple y caracterizarse.

En una realización de la presente invención, la elipticidad de un rastro del centroide normal o la diferencia relativa en la longitud de los dos ejes elípticos se usa para indicar el grado de astigmatismo. En otra realización de la presente invención, el eje de un rastro del centroide elíptico normal se usa para indicar el eje de astigmatismo. En otra realización más de la presente invención, el sensor de frente de onda puede usarse para proporcionar una señal de retroalimentación para corregir el astigmatismo del sistema óptico en frente del módulo del sensor de frente de onda. En tal caso, la dirección de rotación, el eje elíptico y la elipticidad del rastro del centroide pueden usarse todos como retroalimentación en un sistema de control en bucle cerrado para activar un elemento de corrección de astigmatismo, tal como para hacer girar, como elemento combinado, dos lentes 1030, 1031 cilíndricas (como se muestra en la figura 10). En tal caso, si la rotación del rastro del centroide es normal, la elipticidad del rastro del centroide puede minimizarse y, por lo tanto, la circularidad del rastro se maximiza para conseguir autocorrección del astigmatismo. Por otro lado, si la rotación del rastro del centroide es anormal, un buen criterio para corregir el astigmatismo es acortar, en primer lugar, uno de los dos ejes del rastro elíptico para convertir al rastro del centroide a rotación normal y a continuación alargar el mismo eje para circularizar el rastro del centroide. Como resultado, también puede conseguirse autocorrección del astigmatismo.

En otra realización de la presente invención, el modo de funcionamiento de autoenfoco se combina con el modo de funcionamiento de autocorrección del astigmatismo, de modo que, de este modo, pueda conseguirse una corrección en tiempo real tanto de desenfoco como de astigmatismo para un sistema de imaginología óptica, tal como el ojo humano. Una práctica preferida sería conseguir corrección del astigmatismo en primer lugar y a continuación corregir el desenfoco. Sin embargo, esto no significa que la secuencia no pueda invertirse, de hecho, puede usarse un procedimiento iterativo para cambiar entre las dos correcciones hasta que se alcance cierto criterio. Como se describe en la sección de antecedentes de esta solicitud, el desenfoco y el astigmatismo son las dos aberraciones fundamentales que pueden afectar sustancialmente a la calidad de un sistema de imaginología óptica. Por lo tanto, corrigiendo estas dos aberraciones fundamentales usando el sensor de frente de onda descrito anteriormente, puede obtenerse una imagen de alta calidad, tal como una imagen del fondo de un ojo humano.

Aunque en las descripciones anteriores al caracterizar y corregir el desenfoco y el astigmatismo, se ha usado un detector cuádruple para ilustrar el principio de funcionamiento, también pueden usarse otros detectores siempre que puedan proporcionar la información de las posiciones del centroide. Se ha mencionado previamente que el detector puede ser un conjunto de detectores de zona CCD o de zona CMOS. Obviamente, estos detectores también pueden usarse en lugar del detector cuádruple para caracterizar y corregir el desenfoco y el astigmatismo, como se ha descrito anteriormente.

El sensor descrito anteriormente en la presente invención puede tener muchas otras aplicaciones además de usarse como un sensor avanzado en una cámara del fondo del ojo para autoenfoco y corrección del astigmatismo. Por ejemplo, puede usarse en una herramienta de alineamiento óptica, la tecnología principal puede usarse también como las bases de un nuevo autorrefractor. El sensor también puede usarse como un sensor de enfoque general en cualquier aplicación.

La invención puede implementarse, en parte, como código de programa, almacenado en un medio legible por ordenador, esto es ejecutado mediante un ordenador digital. El medio legible por ordenador puede incluir, entre otras cosas, medios magnéticos, medios ópticos, campos electromagnéticos que codifican información digital, y así

sucesivamente.

5 Se entiende que la descripción de las realizaciones preferidas de la invención es solamente para fines de ilustración. Los expertos en la materia pueden reconocer otras realizaciones equivalentes a las descritas en la presente memoria; equivalentes que pretenden estar abarcadas por las reivindicaciones adjuntas a la presente memoria. En una alternativa a la invención, las descripciones son para el caso en el que se usan una única lente de enfoque de subfrente de onda y un único detector cuádruple, sin embargo, esto no significa que el mismo principio de realizar un barrido de un frente de onda para proyectar diferentes posiciones de un frente de onda no pueda aplicarse al caso de dos o más detectores cuádruples u otros módulos de detección. El módulo de barrido de luz también puede proyectar un número múltiple de partes del frente de onda de entrada sobre un número de módulos de detección para acortar adicionalmente el tiempo para completar una serie de caracterización de subfrente de onda. En una alternativa a la invención, el principio de la divulgación puede ampliarse al caso en el que un conjunto lineal de lenticulos se disponen paralelos a un conjunto lineal de detectores cuádruples y, como resultado, el barrido secuencial del frente de onda de entrada puede conseguirse realizando un barrido del frente de onda en una dirección que es perpendicular al conjunto lineal de lenticulos y detectores cuádruples.

15

REIVINDICACIONES

1. Un sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial que comprende:
 - un dispositivo de barrido de frente de onda;
 - una única abertura (218, 418, 518a, 518b, 618a, 618b, 918);
 - 5 un único elemento (220, 420, 520a, 520b, 620a, 620b, 920) de enfoque; y
 - un único dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición, con lo que el dispositivo de barrido de frente de onda está adaptado para desplazar secuencialmente un frente de onda incidente mediante un primer desplazamiento en una primera dimensión y un segundo desplazamiento en una segunda dimensión, dirigiendo de este modo secuencialmente partes del frente de onda incidente hacia la
 - 10 abertura;
 - la única abertura está situada para interceptar y configurada para seleccionar secuencialmente las partes del frente de onda incidente desplazadas por el dispositivo de barrido secuencial;
 - el único elemento de enfoque está configurado para enfocar las partes del frente de onda incidente desplazado seleccionadas por la abertura en un plano focal;
 - 15 el único dispositivo de detección de la posición está ubicado sustancialmente en el plano focal del elemento de enfoque y está configurado para medir los centroides obtenidos secuencialmente de las partes del frente de onda enfocadas y para indicar el desplazamiento bidimensional de los centroides desde puntos de referencia.

 2. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el explorador por barrido de frente de onda comprende:
 - 20 un motor eléctrico que tiene un árbol (214); y
 - un espejo (212) inclinado ubicado sobre el árbol.

 3. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 2, en el que:
 - el motor es un motor paso a paso y el espejo (212) inclinado está montado en un ángulo fijo en el extremo del árbol (214), de modo que un número de subfrentes de onda alrededor de un anillo anular del frente de onda
 - 25 incidente son seleccionados cuando se hace girar al árbol (214).

 4. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el explorador por barrido de frente de onda comprende:
 - un motor eléctrico que tiene un árbol; y
 - un espejo (412) de tambor multifacetado asimétrico montado sobre el árbol.
 - 30 5. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el explorador por barrido de frente de onda comprende:
 - un explorador por barrido basado en MEMS.

 6. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el explorador por barrido de frente de onda comprende:
 - 35 un explorador (512a, 512b) por barrido de haz óptico transmisivo.

 7. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de cualquier reivindicación anterior, en el que:
 - la abertura (218, 418, 518a, 518b, 618a, 618b, 918) es una abertura variable para controlar el tamaño de las partes del frente de onda incidente seleccionado.

 8. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de cualquier reivindicación anterior, en el que el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición es un detector (702) cuádruple que
 - 40 tiene cuatro áreas fotosensibles.
9. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende
 - un dispositivo de barrido de frente de onda adaptado para desplazar secuencialmente un frente de onda
 - 45 incidente de modo que es muestreado un anillo anular.

 10. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el dispositivo de barrido comprende:
 - un elemento reflectante configurado para desplazar el frente de onda incidente en direcciones radial y azimutal de forma gradual.
 - 50 11. El sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, donde el dispositivo de

barrido comprende:

un elemento reflectante configurado para desplazar de forma continua el frente de onda incidente en direcciones radial y azimutal.

5 12. Un procedimiento de detección de la aberración de un frente de onda incidente, comprendiendo dicho procedimiento:

10 desplazar secuencialmente un frente de onda incidente mediante un primer desplazamiento en una primera dimensión y un segundo desplazamiento en una segunda dimensión, dirigiendo de este modo secuencialmente partes del frente de onda incidente hacia una única abertura que intercepta y selecciona secuencialmente las partes de un frente de onda incidente desplazado con una única abertura (218, 418, 518a, 518b, 618a, 618b, 918):

enfocar con un único elemento de enfoque las partes del frente de onda incidente desplazado seleccionadas por la abertura (218, 418, 518a, 518b, 618a, 618b, 918) sobre un único dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición:

15 medir los centroides obtenidos secuencialmente de las partes del frente de onda enfocadas con el dispositivo de detección de la posición; y determinar la deflexión bidimensional de los centroides respecto a puntos de referencia en el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición.

13. El procedimiento de la reivindicación 12, que comprende además:

20 analizar una pluralidad de deflexiones bidimensionales para caracterizar la aberración del frente de onda incidente.

14. El procedimiento de la reivindicación 12 o 13, donde el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición es un detector (702) cuádruple que tiene un punto de referencia y dicha etapa de determinar la deflexión comprende además:

25 calcular coordenadas de deflexión bidimensional de la parte del frente de onda incidente enfocado sobre el detector cuádruple.

15. El procedimiento de la reivindicación 14, que comprende además:

visualizar las deflexiones, de modo que cada parte enfocada se visualice en base a sus coordenadas calculadas.

16. El procedimiento de la reivindicación 13, donde seleccionar comprende además:

30 seleccionar secuencialmente una parte de un frente de onda incidente desplazado dispuesto alrededor de un anillo anular del frente de onda incidente, y donde analizar comprende además:

determinar la dispersión de las deflexiones bidimensionales

17. El procedimiento de la reivindicación 13, donde seleccionar comprende además:

35 seleccionar secuencialmente una parte del frente de onda incidente desplazado dispuesto alrededor de un anillo anular del frente de onda incidente; y donde analizar comprende además; detectar un cambio de signo en la ubicación de una parte enfocada para indicar un cambio de la forma de onda de entrada entre una forma de onda convergente y una forma de onda divergente.

18. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 13 a 17, que comprende además:

visualizar las deflexiones bidimensionales para formar un patrón en un dispositivo de visualización.

40 19. El procedimiento de la reivindicación 13 a 18, que comprende además:

visualizar deflexiones bidimensionales en un dispositivo de visualización en tiempo real.

20. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 12 a 19 inclusive, que comprende además:

hacer pulsar o emitir ráfagas de una fuente de luz que genera el frente de onda.

45 21. El procedimiento de la reivindicación 12 donde la etapa de determinar la deflexión bidimensional de la parte del frente de onda incidente enfocado en el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición respecto a un punto de referencia en el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición comprende

- medir la deflexión bidimensional de la parte enfocada del frente de onda incidente desplazado enfocado sobre el dispositivo (222, 422, 522a, 522b, 622a, 622b, 922) de detección de la posición desde un punto de referencia en el dispositivo de detección de la posición para determinar la aberración del frente de onda incidente;
- 5 y el procedimiento comprende la etapa adicional de formar un criterio de retroalimentación en base a la deflexión bidimensional de la parte enfocada del frente de onda incidente desplazado para usar el criterio de retroalimentación para accionar un dispositivo de compensación de frente de onda para compensar la aberración del frente de onda incidente.
22. El procedimiento de la reivindicación 21, donde seleccionar comprende además:
- 10 seleccionar secuencialmente un número de partes del frente de onda incidente desplazado alrededor de un anillo anular del frente de onda incidente.
23. El procedimiento de la reivindicación 22, donde dicha etapa de formar un criterio de retroalimentación comprende además:
- minimizar la dispersión de las deflexiones como criterio para autoenfocar el frente de onda.
24. El procedimiento de la reivindicación 22, donde dicha etapa de formar un criterio de retroalimentación comprende además:
- 15 detectar un cambio de signo de la deflexión de una parte enfocada como criterio para indicar cuándo está enfocado un sistema óptico en frente del frente de onda.
25. El procedimiento de la reivindicación 22, donde dicha etapa de formar un criterio de retroalimentación comprende además:
- 20 detectar la desviación de un patrón formado por deflexión respecto a un círculo como criterio de retroalimentación para corregir el astigmatismo del frente de onda.
26. El procedimiento de la reivindicación 22, donde dicha etapa de formar un criterio de retroalimentación comprende además:
- 25 detectar la rotación anormal de un patrón formado por deflexión como criterio de retroalimentación para corregir un frente de onda astigmático.
27. El procedimiento de la reivindicación 22, donde dicha etapa de formar un criterio de retroalimentación comprende además:
- detectar la elipticidad del patrón formado por deflexión como criterio de retroalimentación para corregir el astigmatismo.
- 30 28. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 21 a 27, que comprende además:
- controlar un dispositivo de compensación de frente de onda óptico con el criterio de retroalimentación para compensar la aberración del frente de onda incidente.
29. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 21 a 28, que comprende además:
- visualizar las deflexiones bidimensionales en un dispositivo de visualización en tiempo real.
- 35 30. Un sistema de compensación de frente de onda que comprende el sensor (200, 400, 500, 600, 900) de frente de onda secuencial de la reivindicación 1, y que comprende además un dispositivo de análisis de la aberración del frente de onda que genera una señal de retroalimentación en base a ubicaciones detectadas de las partes seleccionadas secuencialmente del frente de onda incidente desplazado; y
- 40 un dispositivo de compensación de frente de onda para compensar aberraciones en el frente de onda que utiliza la señal de retroalimentación en un sistema de control en bucle cerrado para activar la compensación.
31. El sistema de la reivindicación 30, con el dispositivo de compensación de frente de onda comprendiendo:
- una lente óptica accionada axialmente para enfocar el frente de onda.
32. El sistema de la reivindicación 30, con el dispositivo de compensación de frente de onda comprendiendo:
- un elemento de corrección del astigmatismo accionado de manera rotacional.

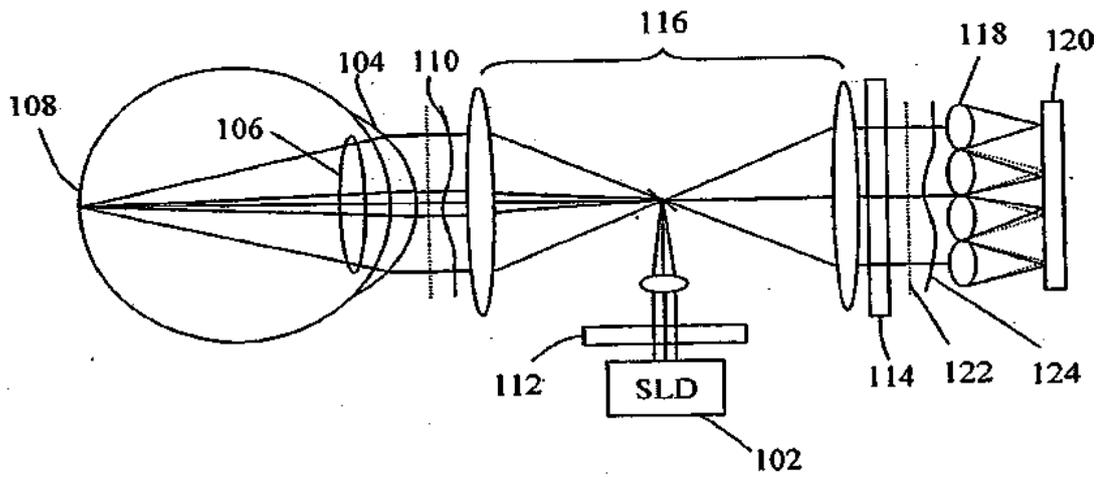


Fig. 1 (Técnica anterior)

200

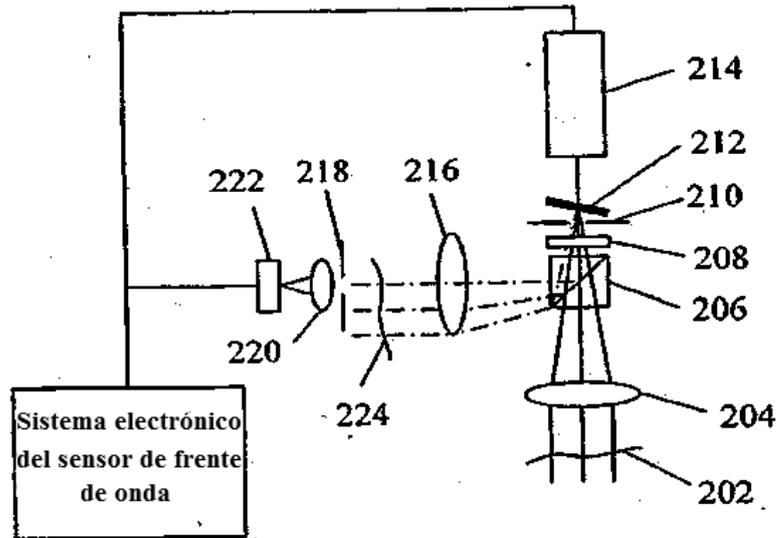


Fig. 2

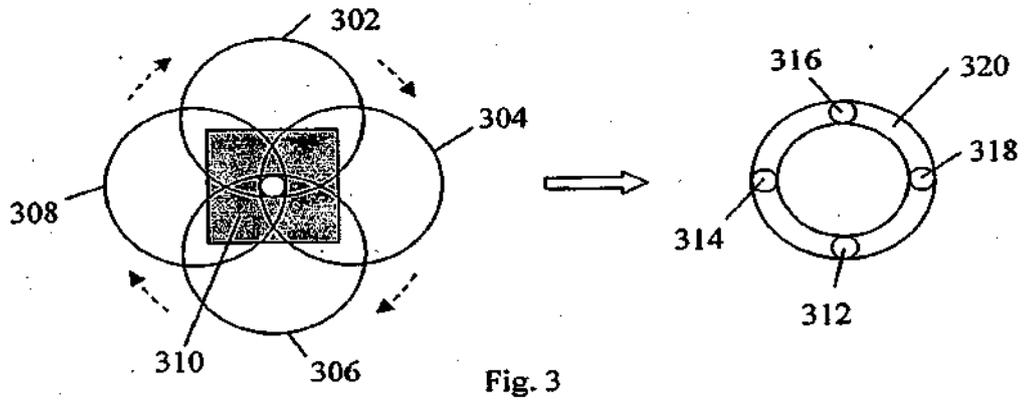


Fig. 3

400

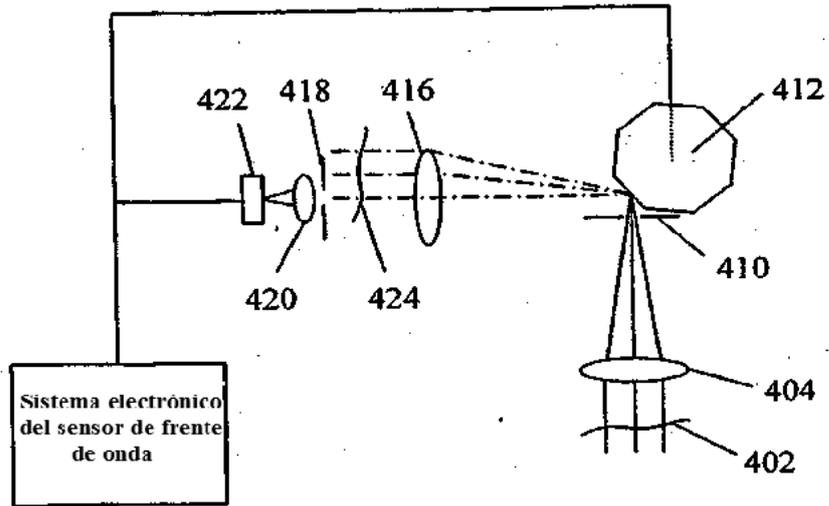


Fig. 4

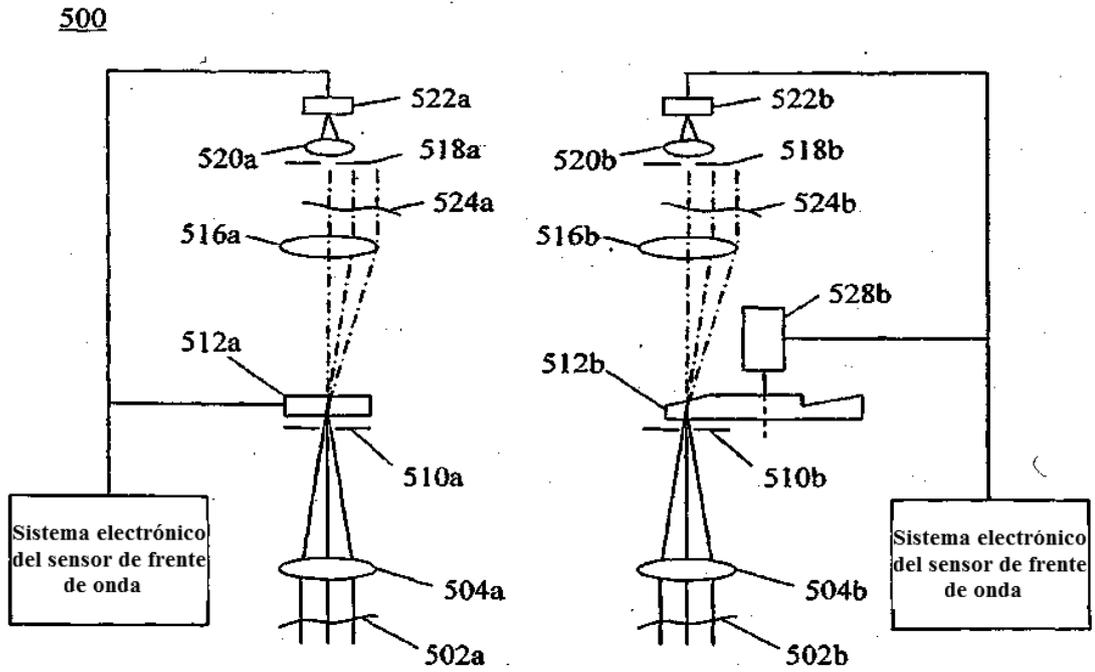


Fig. 5

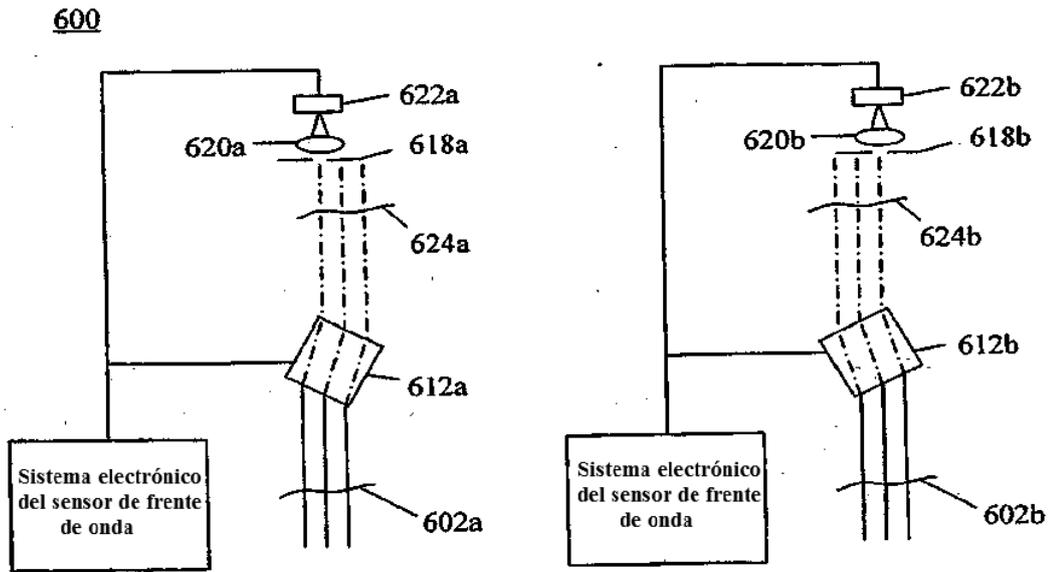


Fig. 6

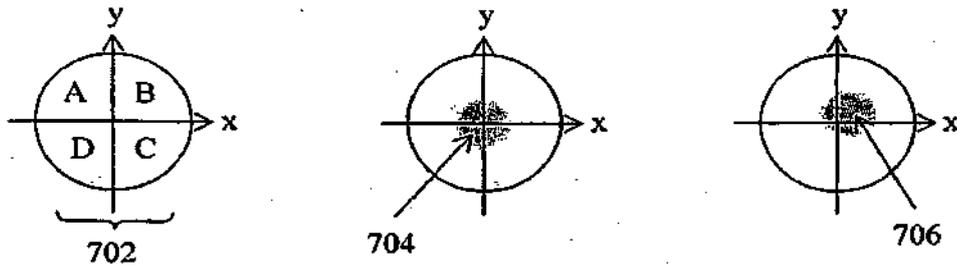


Fig. 7

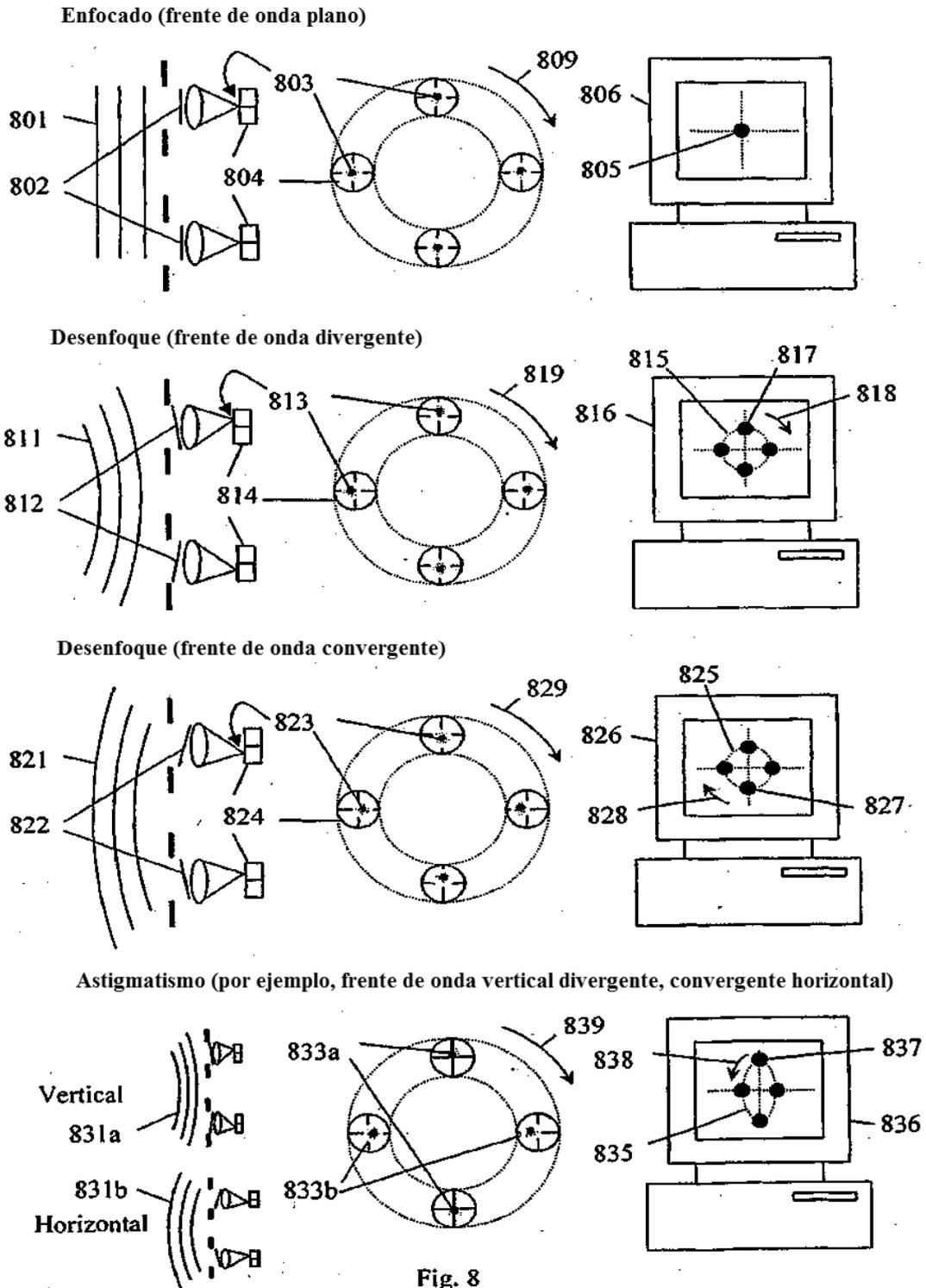


Fig. 8

900

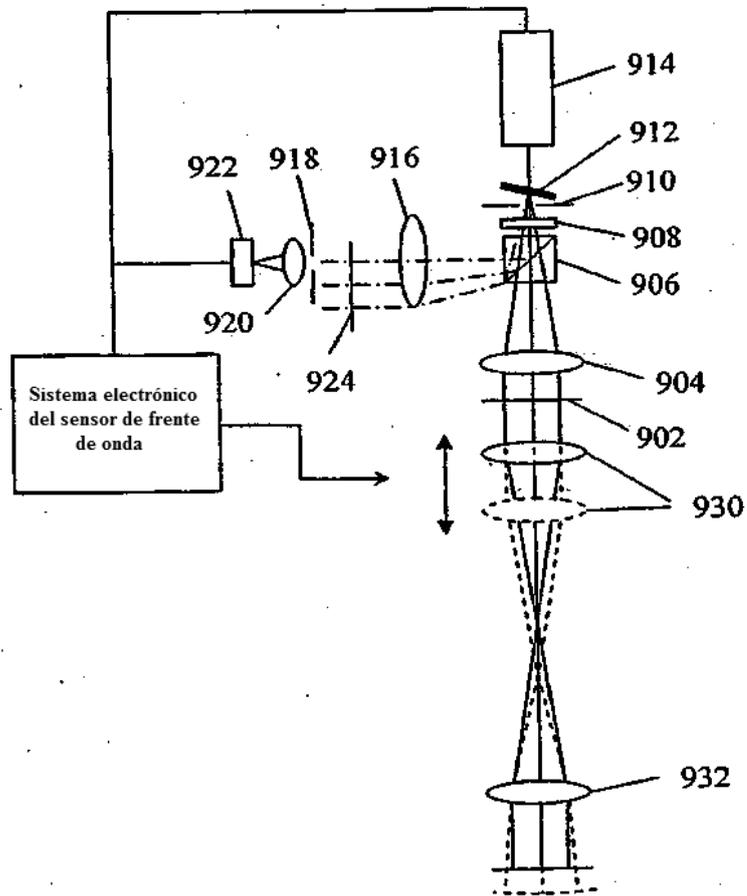


Fig. 9

900

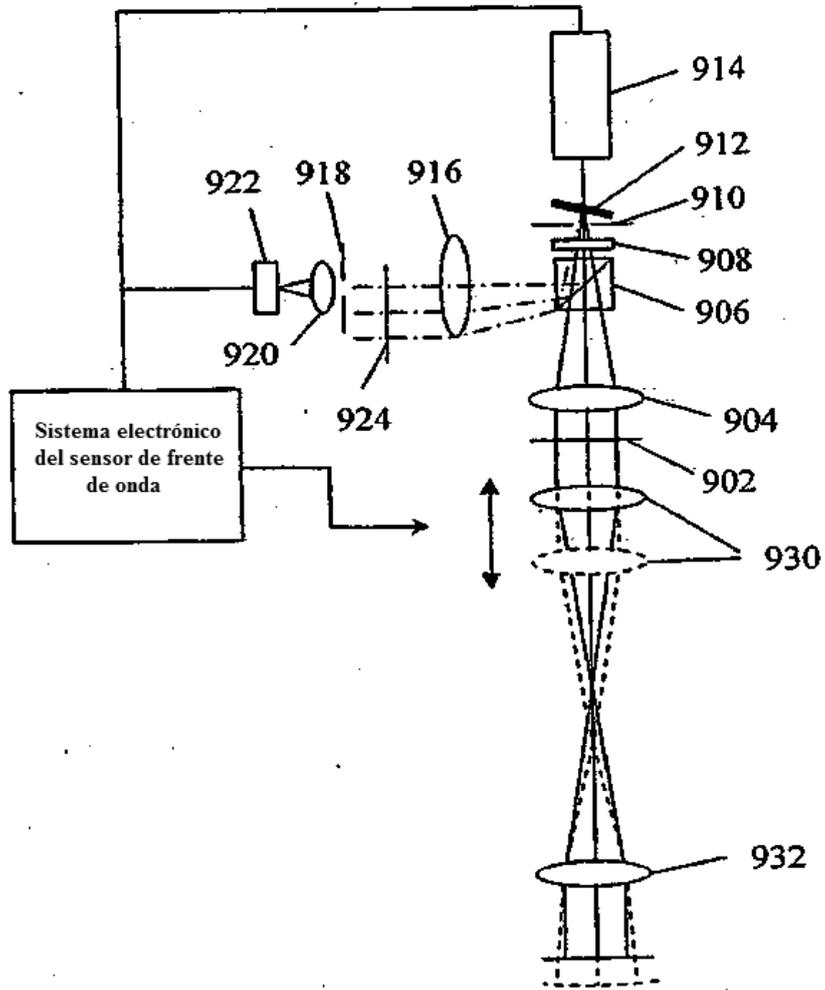


Fig. 10