

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 380 094**

51 Int. Cl.:
A61B 3/103 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **04759631 .7**
- 96 Fecha de presentación: **16.03.2004**
- 97 Número de publicación de la solicitud: **1605815**
- 97 Fecha de publicación de la solicitud: **21.12.2005**

54 Título: **Aberrómetro para deflectometría de Moiré**

30 Prioridad:
25.03.2003 US 397099

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
08.05.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
08.05.2012

73 Titular/es:
**BAUSCH & LOMB INCORPORATED
ONE BAUSCH & LOMB PLACE
ROCHESTER, NEW YORK 14604, US**

72 Inventor/es:
EAGAN, Barry, T.

74 Agente/Representante:
de Elzaburu Márquez, Alberto

ES 2 380 094 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

Aberrómetro para deflectometría de Moiré.

5 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Campo del invento

La invención se dirige principalmente a los aparatos y los métodos de oftalmología de detección de frente de onda y más particularmente a un método y aparato sensor de frente de onda basados en los principios de deflectometría de Moiré.

Descripción de la técnica relacionada

La medición de las aberraciones de frente de onda del ojo hasta décimo orden de Zernike sigue encontrando una creciente aplicación en el campo de la oftalmología, particularmente en relación a los procedimientos quirúrgicos refractivos tales como LASIK, LASEK, PRK y otros. Ya no es suficiente meramente medir la topología de la córnea para determinar cómo reformar mejor la córnea de una persona para la corrección de la visión. Y mientras que los sistemas de topografía corneal se utilizan en combinación con dispositivos de paquimetría y técnicas de trazado de rayos pueden proporcionar una gran cantidad de información acerca de los problemas de visión y los ojos de una persona, la aberrometría proporciona por sí misma información única acerca de los defectos visuales de todo el sistema óptico del ojo. La detección de frentes de onda tiene una aplicación que va desde la medición de refracción de objetivos para la corrección tradicional de desenfoque y el astigmatismo para contribuir a la creación de lentes oftálmicas personalizadas (por ejemplo, lentes de contacto, lentes intraoculares (IOL), etc.) y tratamientos personalizados de ablación láser que tienen el potencial de proporcionar una mejora de la visión hasta el límite teórico del ojo humano.

Los aberrómetros y los principios sobre los que funcionan por lo general se pueden clasificar en cuatro tipos: (1) saliente (por ejemplo, Hartmair-Shack); (2) de doble paso (por ejemplo, esquiascopía de ranuras); (3) entrante ajustable (por ejemplo un refractómetro espacialmente resuelto); y (4) aberrometría de imagen de la retina (por ejemplo, Tracey Tscheming). En el entorno comercial actual, la aberrometría basada en un sensor de frente de onda Hartmann-Shack es la más frecuente. Sin embargo, Hartmann-Shack, así como los otros principios de medición de frente de onda incorporados en los diferentes dispositivos disponibles en el mercado, tiene ventajas y desventajas identificables relativas. El lector interesado puede dirigirse a la Revista de Cirugía Refractiva, vol. 16, No. 5 (septiembre/octubre de 2000), que proporciona una revisión exhaustiva de la aberrometría oftálmica basada en las medidas del Primer Congreso Internacional de detección de frente de onda y corrección refractiva sin aberraciones.

La detección y análisis oftálmicos de frente de onda no se limita de ninguna manera a las categorías descritas anteriormente. Los investigadores en el campo de la psicofísica, tales como Smirnov en la década de 1960, Howland a mediados de los años 80, y Liang y Williams desde finales de los años 80 a mediados de los años 90, por nombrar sólo unos pocos, emplearon diversos principios ópticos para adquirir y analizar datos de la aberración ocular. Del mismo modo, se han transferido una gran cantidad de conocimientos para aplicaciones oftálmicas desde los campos de la astronomía, las iniciativas estratégicas de defensa y las pruebas de lentes ópticas.

En la publicación internacional de solicitud de patente WO 92/01417, Horwitz explicó la medición y la corrección automáticas de la visión binocular apoyándose en la generación y análisis de franjas de Moiré, comúnmente conocida como deflectometría Moiré. La publicación describe un aparato binocular que supuestamente tiene la capacidad de medir hasta 256 aberraciones del ojo, y la aplicación de esta tecnología para el diseño y la fabricación de lentes oftálmicas personalizadas y la cirugía refractiva con láser. En 1999, la patente de EE.UU. de Horwitz 5.963.300 describía un biómetro ocular basado en parte en deflectometría Moiré e incluye una enseñanza limitada del análisis de Fourier para el suministro de información de la aberración del frente de onda. A pesar de la emisión de la patente '300, parecía que la aplicación de la tecnología de detección ocular de frente de onda necesitaba algo más, que al parecer estaba provisto, al menos en parte, por el Método de Transformada de Fourier por parte de Quiroga y otros para el procesamiento automático de deflectogramas de Moiré, Opt. Eng. 38(6) 974-982 (junio de 1999).

Las limitaciones de la medición de los aberrómetros tipo Hartmann-Shack y su tamaño, coste y complejidad son temas muy apreciados por los expertos en la técnica. El inventor ha reconocido que las mejoras de los aparatos y métodos de deflectometría muaré podrían resolver ventajosamente muchas de las cuestiones asociadas con la tecnología actual de los aberrómetros. En consecuencia, la presente memoria descriptiva da a conocer mejores aparatos y métodos de deflectometría de Moiré que el inventor cree que proporcionan mediciones de frente de onda con una mejor resolución, mayor fiabilidad, precisa capacidad de análisis que es más simple, menos costosa y más robusto que los sistemas de aberrómetro ocular disponibles de Hartmann-Shack y otros disponibles en el mercado.

El documento WO 01/58339 describe un sistema de medición de error oftálmico, que incluye un sistema óptico de proyección que entrega luz a la retina de un ojo y un sistema de pre-corrección que compensa un rayo de luz que se inyecta en el ojo para las aberraciones en el ojo. El sistema de pre-corrección se sitúa entre el sistema óptico de

proyección y el ojo. Un sistema de imágenes que recoge la luz dispersada por la retina, y un detector que recibe la luz que es devuelta por la retina desde el sistema de imágenes. El uso del sistema de pre-corrección permite que sean analizadas las aberraciones de extremo a extremo del sistema ocular. El uso de un sistema de pre-corrección también permite el uso de un tamaño de punto mínimo en la retina, y todas sus ventajas que conlleva.

El documento US-A-5 963 300 se refiere a un biómetro ocular que utiliza una fuente emisora de luz y la óptica correspondiente para iluminar unas zonas de los ojos con el fin de analizar el frente de onda de la luz reflejada. Se utilizan elementos que comparten la apertura, tales como "espejos calientes" para permitir que los ojos vean el mundo, a medida que el biómetro ocular mide diversas características de los ojos, tales como del estado refractivo (es decir, acomodativo), el ángulo de la mirada y el diámetro de la pupila en cualquier instante de tiempo y de forma continua. Las técnicas de acondicionamiento óptico del frente de onda y de detección de frente de onda se utilizan para determinar la potencia refractiva del ojo y el estado acomodativo instantáneo. La luz reflejada se proyecta a través de una retícula o pluralidad de retículas. Las características espaciales del patrón de sombra resultante determinan de forma única las características del ojo. Estos patrones de sombra se pueden medir directamente o provocando una modulación de las líneas con una segunda retícula idéntica colocada adecuadamente entre el primero y el plano de la imagen. Se puede utilizar la pupila brillante y una imagen de Purkinje para calcular el ángulo de la mirada (o, de línea de visión).

El documento WO 96/22506 se refiere a un dispositivo óptico y un método de utilización de dicho dispositivo, basado en la idea de la interferometría, para el examen óptico de objetos en los que el dispositivo óptico comprende un par de injertos de difracción (G1, G2) con cada uno de los injertos diseñado para reducir sustancialmente todos los órdenes de difracción, excepto los órdenes de difracción +1 y -1 por el fenómeno de las ondas evanescentes y la cancelación de orden cero.

El documento US-A-5 374 193 describe un aparato de formación de alojamiento que se modifica para incluir un aparato de electroencefalografía para monitorizar las ondas cerebrales del paciente. Esto permite a un paciente ser entrenado para entrar y permanecer en el estado alfa, incluso con los ojos abiertos y con algo para mirar.

El documento US 2002/163623 describe un aparato de medición de característica oftálmica, en el que una primera señal y una segunda señal son capturadas al mismo tiempo, y las características ópticas de un ojo objeto y la forma corneal de los mismos se miden de forma simultánea o substancialmente al mismo tiempo.

SUMARIO DE LA INVENCION

Un dispositivo según la invención se define en la reivindicación 1.

Los aspectos preferidos de la presente realización son los siguientes: La fuente de luz emite luz coherente en forma de un haz colimado que tiene un diámetro en sección transversal en una superficie anterior del sistema óptico (por ejemplo la película lagrimal/córnea) más grande que el tamaño limitado de difracción de hasta aproximadamente 1 mm. El eje de propagación del haz colimado en la superficie anterior se desplaza en paralelo desde el eje óptico del sistema óptico en aproximadamente 1 mm. Una longitud de onda preferida es aproximadamente 780 nm. El deflectómetro incluye una primera rejilla cuadrada que tiene unas líneas de rejillas periódicas y ortogonales entre sí, y una segunda rejilla cuadrada preferentemente idéntica. Las dos rejillas cuadradas se encuentran en el eje óptico con las líneas de división de la primera rejilla alineadas a lo largo de los ejes x e y en un plano x-y de un sistema de coordenadas cartesianas correspondiente a la alineación del detector en el conjunto de sensor/cámara. La segunda rejilla cuadrada se encuentra a una o varias distancias Talbot aguas abajo de la primera rejilla cuadrada y girada en el plano x-y con respecto a la primera rejilla con un ángulo θ , entre, pero no incluyendo, 0° a 90° . La fuente de iluminación tiene una longitud de onda en un intervalo entre 800 nm y 900 nm y preferiblemente es una fuente de luz controlable que proporciona una iluminación uniforme de la pupila de salida del sistema óptico durante una fase de alineación de la medición de frente de onda y que es capaz de no iluminar la pupila de salida del sistema óptico durante una fase de adquisición de la medición de frente de onda. El dispositivo incluye además un sistema de alineación que preferiblemente tiene un indicador de retículo generado por software en la pantalla de la cámara para proporcionar la identificación de una posición central de la pupila de salida a lo largo del eje de medición del dispositivo.

La presente invención se hará más evidente a partir de la siguiente descripción detallada. Sin embargo, debe entenderse que la descripción detallada y los ejemplos específicos, aunque indican las realizaciones preferidas de la invención, se proporcionan solo a modo de ilustración.

BREVE DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

- La figura 1 es una ilustración esquemática de un deflectómetro Moiré de acuerdo con una realización de la invención;
- La figura 2 muestra el principio de imágenes Talbot no aberradas de un objeto periódico;
- La Figura 3 ilustra una imagen Talbot aberrada de un objeto de periódico;
- La Figura 4 ilustra una imagen Talbot aberrada de un objeto de periódico cuadrado cruzado;

La Figura 5 ilustra un efecto Moiré debido a la rotación relativa entre un primer objeto periódico y un segundo objeto de periódico;

La Figura 6 muestra un efecto Moiré debido a la superposición de una imagen Talbot distorsionada y un segundo objeto periódico;

La figura 7 es una ilustración esquemática de la rotación relativa entre dos rejillas cruzadas en un plano x-y de acuerdo con una realización de la invención; y

La figura 8 es una ilustración esquemática de una imagen de cámara de una pupila de salida de un sistema óptico a prueba alineada con un retículo de acuerdo con una realización de la invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE UNA REALIZACIÓN PREFERIDA DE LA INVENCION

Una realización del aparato 100 de sensor de frente de onda Moiré de acuerdo con la invención se ilustra en la figura. 1. El dispositivo, en esencia, un deflectómetro Moiré, mide y analiza las aberraciones de frente de onda de un sistema óptico 110. Los sistemas ópticos de interés incluyen los ojos humanos vivos y objetos de prueba con fines de calibración, sin embargo, la invención no se limita a la medición de estos objetos. El sistema 110 funciona como un sistema de medición de un solo paso de frente de onda tal como se entiende el término en la técnica. Es decir, una fuente puntual de luz de un diámetro adecuado de punto se crea en una superficie posterior difusa 112 del sistema óptico; es decir, la retina. La superficie posterior 112 reflejará de manera difusa y dispersará el pequeño punto de luz a través y afuera del sistema óptico 110 en forma de un frente de onda 125.

El principio fundamental de funcionamiento del aparato descrito en este documento se basa en imágenes de Talbot. Las imágenes de Talbot es un fenómeno de difracción que se produce con un objeto periódico, por ejemplo, una reja de transmisión. Bajo una iluminación adecuada mediante una onda plana, réplicas perfectas de los objetos aparecen a distancias fijas llamadas planos de Talbot, como se ilustra en la Fig. 2. Las ubicaciones de los planos Talbot, Z_j , dependen del periodo, p , del objeto y la longitud de onda, λ , de la luz de acuerdo a la relación $Z_j = - p^2 j / \lambda$. Si el frente de onda de la iluminación es aberrado, las imágenes Talbot se distorsionan, como se ilustra en la Fig. 3. La cantidad de distorsión depende de la pendiente del frente de onda en la dirección perpendicular a la orientación de la rejilla del objeto. Unas rejillas cruzadas, como se ilustra en la Fig. 4 y se describe con detalle más adelante, se pueden utilizar para recuperar la pendiente del frente de onda en dos direcciones ortogonales. Para grandes periodos de rejillas, las imágenes Talbot distorsionadas pueden capturarse y analizarse convenientemente. Para aumentar la resolución, sin embargo, se pueden utilizar periodos de reja más finos mediante la colocación de una segunda reja en uno de los siguientes planos de Talbot y rotándola en el plano del primer objeto de reja. Esto da lugar a un efecto Moiré, como se ilustra en la Fig. 5. La superposición de la imagen de Talbot distorsionada y la segunda reja produce un patrón de franjas de Moiré. La forma del patrón de Moiré se relaciona con la pendiente del frente de onda, que se ilustra en la Fig. 6.

El aparato 100 incluye una fuente de luz 120 adecuada para la iluminación de una zona superficial seleccionada 112 del sistema óptico 110, un sistema de transmisión óptica 140 para dirigir la luz dispersada desde la zona superficial del sistema óptico a un deflectómetro 150, que produce un patrón 500 de franjas de Moiré a partir del frente de onda saliente 125. Se proporciona un conjunto de sensor/cámara y se alinea de una manera tal para capturar el patrón de franjas de Moiré que puede ser analizado por un analizador 170 de patrón de franjas (por ejemplo, ordenador personal programado) para proporcionar información de la aberración del frente de onda para varios propósitos relacionados con los métodos y aparatos de medición y corrección de la visión. El dispositivo 100 incluye además una fuente de iluminación 130 para proporcionar iluminación para la toma de imágenes de una pupila de salida 114 del sistema óptico y un sistema de alineación 180 que facilita la alineación y medición consistentes relacionadas con un sistema de coordenadas 190 asociado con el dispositivo como se muestra. El dispositivo tiene una orientación con respecto a un sistema de coordenadas cartesianas, como se ilustra en la Fig. 1; es decir, el eje z 185 representa el eje de medición del dispositivo, y los diferentes lentes, rejillas y el detector/cámara se encuentran en los planos x-y alineados con los ejes x e y.

En una realización preferida acorde con la invención, el sistema óptico 110 es un ojo humano vivo y la zona superficial de la superficie posterior 112 es un área foveal de la superficie de la retina del ojo. Una fuente de luz 120 emite iluminación para iluminar la zona superficial seleccionada del sistema óptico en forma de sustancialmente una fuente puntual de luz. La fuente de luz 120 puede ser cualquier fuente adecuada conocida por los expertos en la técnica que emita luz coherente con una longitud de onda preferiblemente en el espectro de infrarrojos cercanos. El intervalo de longitudes de onda está preferiblemente entre 770 nm y 790 nm, y más preferentemente aproximadamente en 780 nm. La iluminación 121 está acondicionada ya sea interna o externamente a la fuente de luz 120 por medios bien conocidos para ser en forma de un haz colimado de luz que tiene un diámetro de haz en sección transversal que va desde un poco mayor que una cantidad limitada de difracción hasta aproximadamente 1 mm o próximo a una superficie anterior 116 del sistema óptico. En una realización preferida oftálmica, la entrada de luz colimada al ojo tendrá un diámetro de haz entre aproximadamente 300 micrómetros y aproximadamente 1.000 micrómetros, y más preferentemente entre 600 y 1.000 micrómetros, en la superficie de la película córnea/lágrima de los ojos. El haz colimado de entrada 121 tiene un eje de propagación 118 que preferentemente se desplaza paralelo al eje z 185 del sistema una distancia de aproximadamente 1 mm. El desplazamiento del haz entrante elimina la reflexión especular; por ejemplo, la primera imagen de Purkinje, desde la superficie de la córnea y los reflejos desde otras superficies del sistema óptico que pueden oscurecer el débil reflejo de la retina que contiene la información del

frente de onda a medir. Los expertos en la técnica apreciarán que un pequeño desplazamiento y pequeño diámetro del haz en la superficie de la córnea reducirá la aberración inducida por la córnea del haz entrante.

Es bien sabido que en un ojo emélope, una entrada de frente de onda plano al ojo se enfocará a un punto en la superficie de la retina. Un ojo miope o hipermetrope, sin embargo, enfocará el mismo frente de onda de entrada en puntos por delante o por detrás de la retina, respectivamente, de tal manera que el punto de luz en la superficie de la retina ya no será una fuente puntual de tamaño adecuado para una medida conveniente o incluso posible del error del frente de onda. El haz de entrada de diámetro pequeño tal como se describe en esta memoria, que se denomina como inyección directa debido a la eliminación de la necesidad de componentes de refracción en la trayectoria del haz entre la fuente y el objeto, ha demostrado evitar los problemas de desenfoque por miopía o hipermetropía sin el uso de ópticas externas de enfoque y polarización o el ajuste de longitud de recorrido del haz. Un intervalo preferido de medición de dioptrías es de entre -12 a +6 dioptrías y, más preferentemente, entre ±20 D. La inyección directa de la luz de iluminación se describe en el documento US 2003 0117581. El lector interesado se dirige también al documento de Williams *et. al.* U.S. 6.264.328 para una exposición detallada de un sensor de frente de onda con una iluminación fuera del eje.

La superficie de la retina del ojo, o la superficie posterior del sistema óptico, refleja de forma difusa y dispersa la fuente puntual de luz formando un frente de onda aberrado 125 que se desplaza fuera del sistema óptico. Un sistema de envío 140 bien conocido por los expertos en la técnica dirige la propagación del frente de onda 125 a un deflectómetro 150, que se describe a continuación.

El deflectómetro 150 se compone de dos componentes 151, 151'. Cada uno de los componentes tiene una rejilla de líneas de rejilla ortogonales igualmente periódicas 152, 152'; por ejemplo, cada componente es una retícula cruzada de rejillas cuadradas, como se muestra en la Fig. 7 (en adelante, las rejillas cuadradas primera y segunda 151, 151'). Las líneas de rejilla 152 (152') preferiblemente se graban con láser en un sustrato de vidrio, pero no están tan limitadas en cuanto a la construcción de acuerdo con la invención. Las rejillas cuadradas 151, 151' preferiblemente son idénticas. La primera rejilla cuadrada 151 se coloca a lo largo del eje de medición 185 para interceptar el frente de onda 125 que se desplaza de izquierda a derecha como se muestra en la Fig. 1. Como se ilustra con mayor detalle en la Fig. 4, la primera rejilla cuadrada 151 se alinea en el plano x-y de tal manera que las líneas de rejilla horizontales son paralelas al eje x y las líneas de rejilla verticales son paralelas al eje y del sistema de coordenadas del dispositivo. Lo más preferible es que la parte del detector del conjunto de sensor/cámara 160 también tenga una alineación sustancialmente idéntica en el plano x-y con la primera rejilla cuadrada 151. El incumplimiento al acoplar estas alineaciones hace que sea difícil, si no imposible, desacoplar las aberraciones medidas en los ejes x e y, lo que es preferible para aplicaciones de detección de frente de onda oftálmico. El alineamiento mutuo descrito anteriormente puede ser una característica estructural fija del dispositivo. La segunda rejilla cuadrada 151' se desplaza aguas abajo de la primera rejilla cuadrada a lo largo del eje z, como se muestra en la Fig. 1 una distancia nT donde T es la distancia de Talbot y n es un entero. En una realización preferida, n = 1. En el dispositivo, la segunda rejilla cuadrada 151' se inclina selectiva y fijamente en el plano x-y con respecto al primer componente con un ángulo, θ, donde 0° < θ < 90°. Quiroga *et al* ha demostrado, Método de transformada de Fourier para el procesamiento automático de deflectogramas de Moiré. *Opt. Eng.* 38(6) 974-982 (junio de 1999), que la disposición típica de las rejillas en las que se giran simétricamente θ/2 y -θ/2 con respecto al eje de referencia, no es muy adecuada para separar completamente los componentes x e y del gradiente de frente de onda. Los resultados obtenidos para las desviaciones son,

$$\widehat{\varphi}_x = \frac{\varphi_x \cos \theta}{2} + \varphi_y \sin \frac{\theta}{2} \quad \text{y} \quad \widehat{\varphi}_y = \frac{\varphi_y \cos \theta}{2} + \varphi_x \sin \frac{\theta}{2}$$

Estas ecuaciones indican que con las disposiciones simétricas estándar de las rejillas, no se puede conseguir un completo desacoplamiento de las desviaciones en las direcciones x e y. Cuando θ = 0, las desviaciones se desacoplan, pero no se necesita un transporte espacial para el análisis de Fourier de la salida de franjas. Se prefiere

el mayor transporte espacial posible. Por lo tanto, θ debe ser lo suficientemente grande para que $\sin \frac{\theta}{2} \neq 0$, con θ_{max} dependiendo del tamaño de la matriz CCD y del tamaño de separación P de la rejilla, ya que el factor de amplificación P' = P/θ. Si θ se hace demasiado grande, puede ser difícil tomar imágenes de las franjas en la matriz CCD. Si θ es demasiado pequeño, el transporte espacial se pone en peligro. El lector interesado en una exposición más detallada de deflectómetros de Moiré y el análisis se dirige al texto de Kafri y Glatt titulado La física de la Metrología Moiré, John Wiley & Sons, Nueva York (1990).

Un conjunto 160 de sensor/cámara de patrón de franjas que comprende un detector CCD y una cámara se proporciona, en parte, para detectar las franjas de Moiré y transmitir estos datos a un analizador 170 de franjas. El conjunto de sensor/cámara se utiliza también para tomar imágenes y mostrar la pupila de salida del sistema óptico; es decir, la pupila del ojo. En este sentido, el dispositivo 100 incluye además una fuente de iluminación 130 y un sistema de alineación 180 acoplado cooperativamente. La luz emitida por la fuente de iluminación 130 debe iluminar de manera uniforme el plano de la pupila de salida. Es preferible en el espectro infrarrojos lejanos en un intervalo de

longitudes de onda que no provoque un cambio en el tamaño de la pupila, debido a la respuesta a la luz, pero al mismo tiempo sea detectable por la cámara para obtener imágenes de la pupila de salida. Una longitud de onda de aproximadamente 880 nm ha demostrado ser eficaz, pero se pueden utilizar otras longitudes de onda como apreciarán los expertos en la técnica. En funcionamiento, la fuente de iluminación estará en un modo de iluminación (encendido) durante la alineación de los ojos del paciente. Mientras se está haciendo la medición del frente de onda, conocida como el modo de medición, la fuente de iluminación estará en un modo sin iluminación (apagado, o bloqueado de otra manera para no iluminar el ojo). En un ejemplo de realización, la fuente de iluminación es en forma de un anillo total o parcial de varios LED colocados adecuadamente para iluminar de manera uniforme el plano de la pupila de salida.

Con el fin de medir con precisión y coherencia las aberraciones de los frentes de onda, tiene que haber una alineación precisa y consistente entre el eje de medición 185 del dispositivo 100 y el ojo que se está midiendo. Si la pupila de salida del sistema óptico no está bien centrada y alineada, la imagen de la pupila de salida puede aparecer como una imagen normalmente redonda, sin embargo puede estar viñeteada sin saberlo debido a la falta de alineación. La falta de centrado y alineación consistente del dispositivo puede dar lugar a medidas de frente de onda diferentes y erróneas de los ojos que se miden cada vez que se obtiene una medición. Como parte del sistema de alineación 180 y el procedimiento relacionado, se proporciona un indicador 315 de retículo como se ilustra en la Fig. 8 para ayudar en el centrado de la pupila de salida 114 con el eje de medición 185 del dispositivo. La pupila puede verse directamente a través de la cámara 160. En una realización preferida, el indicador de retículo se implementa mediante software y se muestra con la imagen de pupila del ojo, permitiendo al usuario enfocar en el centro de la pupila de manera repetida. Son posibles otros sistemas de alineación. El eje visual, por ejemplo, podría utilizarse para la alineación en lugar del centro de la pupila. El punto importante es alinear constantemente la pupila de salida cada vez que se realiza una medición.

La óptica del dispositivo (retículas, lentes, detectores, etc.) debería ser suficiente para medir preferiblemente una pupila de salida que tiene hasta un diámetro de 8 mm. Este tamaño representa el diámetro substancial de la pupila para una medida y corrección de la aberración de mayor orden mediante lentes personalizadas o la cirugía refractiva (por ejemplo, LASK, LASEK, PRK, etc. personalizados) Puede ser deseable una mayor capacidad de medición de diámetro. Se prefiere un intervalo de medición dinámica de ± 20 dioptrías.

Un analizador 170 de patrón de franjas se acopla cooperativamente con el sensor 160 y se programa para calcular las aberraciones del frente de onda basándose en el análisis de las franjas de Moiré detectadas. Un esquema del procedimiento de análisis del patrón de franjas muaré (interferograma de Talbot, patrón de sombra) para el cálculo de la aberración del frente de onda se presentó en el documento U.S. 5.963.300 de Horwitz. En esencia, el análisis comprende las etapas de detección del patrón de franjas (Moiré, Talbot, Fresnel, sombras, etc.) y su digitalización; la conversión de la imagen digital desde el dominio espacial al dominio de la frecuencia espacial; la determinación de los armónicos predominantes; la correlación de los armónicos predominantes con la figura del frente de onda en ejes definidos; el cálculo de una figura tridimensional del frente de onda de dominio óptico; y el análisis de las mediciones resultantes. Una descripción elegante de una técnica para el análisis de deflectogramas de Moiré se presenta por Quiroga *et al, id*. Una persona experta en la técnica podría utilizar la enseñanza de Quiroga *et. al.* para desarrollar el software adecuado para extraer la información del frente de onda de la información de fase en el deflectograma.

El análisis de la aberración de frente de onda puede expresarse en forma de polinomios de Zernike que se pueden utilizar para programar tornos u otros dispositivos para el diseño y fabricación de lentes de contacto personalizadas, lentes intraoculares personalizadas y similares, y para desarrollar patrones de ablación utilizados en la cirugía refractiva con láser, como es conocido por los expertos en la técnica.

Dado que el dispositivo como se describe en esta memoria puede medir la aberración de frente de onda desacoplada a partir del desenfoque (segundo orden) hasta pasando el quinto orden, el dispositivo tiene otras aplicaciones ventajosas como foróptero de objetivo. También podría implementarse un dispositivo binocular basado en los principios descritos en este documento. La pupilometría binocular es la mejor forma de medir el diámetro de la pupila ya que el comportamiento de ambas pupilas está acoplado.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (100) deflectómetro de Moiré para la medición de una aberración de frente de onda de un sistema óptico (110), dicho dispositivo incluye una primera fuente de luz (120) para iluminar una zona superficial seleccionada (112) del sistema óptico (110), un sistema de envío óptico (140) para dirigir la iluminación de la fuente de luz desde la primera fuente de luz (120) y dispersada desde la zona superficial (112) del sistema óptico (110) a un componente (150) del deflectómetro, en el que dicho componente de deflectómetro adapta un frente de onda (125) desde el sistema óptico a un patrón de franjas de Moiré (500), un analizador (170) de franjas adaptado para calcular la aberración de frente de onda del sistema óptico (110), y
 5 una segunda fuente de luz (130) para iluminar la pupila de salida (114) del sistema óptico; **caracterizado por** una cámara de detector CCD con lentes asociadas (160) adaptadas para tomar imágenes y mostrar una pupila de salida (114) del sistema óptico (110) y el patrón de franjas Moiré; y
 10 un sistema de alineación (180) que coopera con la segunda fuente de luz (130) de una manera tal para alinear de manera consistente un eje de medición (185) del dispositivo con el sistema óptico, en el que la segunda fuente de luz (130) para iluminar la pupila de salida (114) del sistema óptico (110) tiene una longitud de onda en el intervalo entre 800 nm y 900 nm.
2. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la luz (121) de la primera fuente de luz (120) es una luz coherente.
 20
3. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la luz (121) de la primera fuente de luz (121) es en forma de un haz colimado que tiene un diámetro en sección transversal mayor que una cantidad limitada de difracción de hasta 1 mm antes de iluminar la zona superficial seleccionada del sistema óptico (110).
4. El dispositivo de la reivindicación 3, en el que el diámetro en sección transversal está entre 300 μm y 600 μm .
 25
5. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la iluminación de fuente de luz de la primera fuente de luz (120) tiene un eje de propagación entrante (118) que se desplaza desde un eje óptico centrado (185) del sistema óptico.
6. El dispositivo de la reivindicación 5, en el que el desplazamiento es aproximadamente 1 mm.
 30
7. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la iluminación de fuente de luz de la primera fuente de luz (120) tiene una longitud de onda en el espectro de infrarrojos cercanos.
8. El dispositivo de la reivindicación 7, en el que la longitud de onda está en el intervalo de entre aproximadamente 770 nm y 790 nm.
 35
9. El dispositivo de la reivindicación 8, en el que la longitud de onda es aproximadamente 780 nm.
10. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el deflectómetro comprende una primera rejilla cuadrada (151) que tiene unas líneas de rejilla (152) que son igualmente periódicas en direcciones ortogonales, dicha rejilla está con una alineación fija con el sensor de manera que dichas líneas de rejilla y un eje horizontal y un eje vertical del sensor se alinean con unos ejes x e y y de un sistema de coordenadas de referencia del dispositivo, y comprende además una segunda rejilla cuadrada (151') que es substancialmente idéntica a la primera rejilla cuadrada, en la que dichas rejillas primera y segunda se encuentran a lo largo de un eje z (185) del sistema de coordenadas de referencia con una distancia de separación, nT, donde n es un entero igual o mayor que uno y T es una distancia de Talbot, en el que además la segunda rejilla se rota en el plano x-y con respecto a la primera rejilla con un ángulo, θ , donde $0^\circ < \theta < 90^\circ$.
 40
 45
11. El dispositivo de la reivindicación 10, en el que $1^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$.
 50
12. El dispositivo de la reivindicación 10, en el que el deflectómetro es un material de vidrio que tiene líneas de rejilla grabadas con láser.
13. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que la longitud de onda es de aproximadamente 800 nm.
 55
14. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la segunda fuente de luz (130) tiene un modo de iluminación y un modo sin iluminación.
 60
15. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que la segunda fuente de luz (130) es con forma de un anillo de dispositivos emisores de luz situados adecuadamente para iluminar uniformemente la pupila de salida (114).
16. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el sistema de alineación (180) comprende un indicador de retículo (315) para identificar una posición de centrado de la pupila de salida (114) en el retículo.
 65

17. El dispositivo de la reivindicación 16, en el que el indicador de retículo es un indicador implementado por software.
- 5 18. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el analizador (170) de patrón de franjas es un componente adaptado para implementar un análisis, de transformada de Fourier conducido por software, del patrón de franjas de Moiré.
- 10 19. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el sistema óptico (110) es una lente de pruebas, en el que la zona superficial seleccionada (112) es una zona de una superficie posterior, que refleja de manera difusa, de la lente de pruebas.
- 15 20. El dispositivo de la reivindicación 1, en el que el sistema óptico (110) es un ojo, en el que la zona superficial seleccionada (112) es una región foveal de la superficie de la retina del ojo.
- 20 21. El dispositivo de la reivindicación 10, en el que las líneas de rejilla cuadrada primera y segunda que incorporan materiales transmisores que son igualmente periódicas en direcciones ortogonales son parejas cruzadas idénticas de rejillas de Ronchi.
- 25 22. Un método para la medición de una aberración de frente de onda de un sistema óptico (110) utilizando un dispositivo de deflectómetro de Moiré, que comprende las etapas de:
- 30 proporcionar dicho dispositivo que incluye una primera fuente de luz (120), un analizador (170) de patrón de franjas, un sistema de alineación (180) y un componente (150) de deflectómetro, que comprende una rejilla cuadrada primera y segunda, en el que dicha primera rejilla cuadrada tiene una líneas de rejilla que son igualmente periódicas en direcciones ortogonales, dicha primera rejilla cuadrada está en alineación fija con el sensor de tal manera que dichas líneas de rejilla ortogonales y un eje horizontal y un eje vertical del sensor se alinean con unos ejes x e y de un sistema de coordenadas de referencia del dispositivo, y además en el que dicha segunda rejilla cuadrada se encuentra aguas abajo de dicha primera rejilla cuadrada con una distancia de separación, nT , donde n es un entero igual o mayor que uno y T es una distancia de Talbot, la segunda rejilla se rota de manera fija en el plano x-y con respecto a la primera rejilla con un ángulo, θ , donde $0^\circ < \theta < 90^\circ$;
- 35 que proporciona además una cámara de detector CCD con lentes asociadas (160); que proporciona además una segunda fuente de luz (130); iluminar uniformemente una pupila de salida (114) del sistema óptico (110) con la luz de la segunda fuente de luz (130); obtener una imagen de la pupila de salida (114) que incluye un indicador de alineación y de un patrón de franjas de Moiré con el conjunto de cámara de detector de CCD;
- 40 alinear de manera consistente la pupila de salida (114) con respecto al indicador de alineación cada vez que se va a hacer una medición de frente de onda; iluminar una región superficial seleccionada, que refleja de manera difusa, del sistema óptico (110) con un punto de luz de tamaño adecuado proporcionado por la primera fuente de luz (120); y obtener datos de aberración del frente de onda, en el que la segunda fuente de luz (130) para la iluminación de la pupila de salida (114) del sistema óptico (119) tiene una longitud de onda en el intervalo de entre
- 45 aproximadamente 800 nm y 900 nm.
23. El método de la reivindicación 22, en el que la etapa de iluminar uniformemente la pupila de salida (114) comprende el uso de un anillo, o por lo menos una parte del mismo, de fuentes emisoras de luz.
- 50 24. El método de la reivindicación 22, en el que la etapa de iluminar uniformemente la pupila de salida (114) comprende el uso de luz con una longitud de onda de aproximadamente 880 nm.
25. El método de la reivindicación 22, en el que la etapa de alinear de manera consistente la pupila de salida (114) comprende la alineación de un centro de la pupila de salida con un eje de medición del dispositivo.
- 55 26. El método de la reivindicación 22, en el que la etapa de alinear de manera consistente la pupila de salida (114) comprende la alineación de un eje visual a través de la pupila de salida con un eje de medición del dispositivo.
- 60 27. El método de la reivindicación 22, en el que la etapa de iluminar una región superficial seleccionada que refleja de manera difusa comprende inyectar directamente un haz coherente colimado en el sistema óptico (110).
28. El método de la reivindicación 22, en el que el haz tiene un diámetro de entre aproximadamente 600 y 1.000 μm .

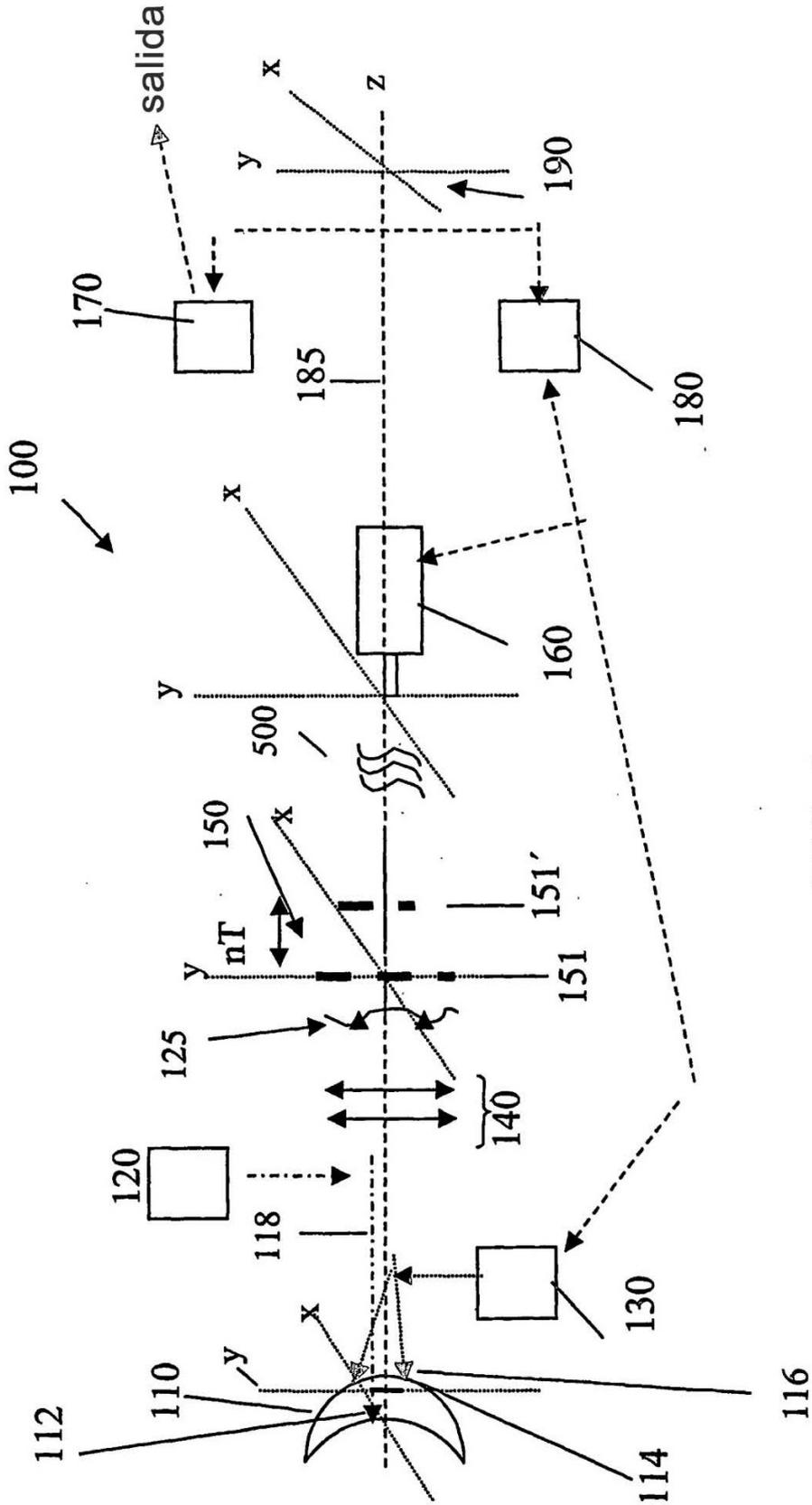


FIG. 1

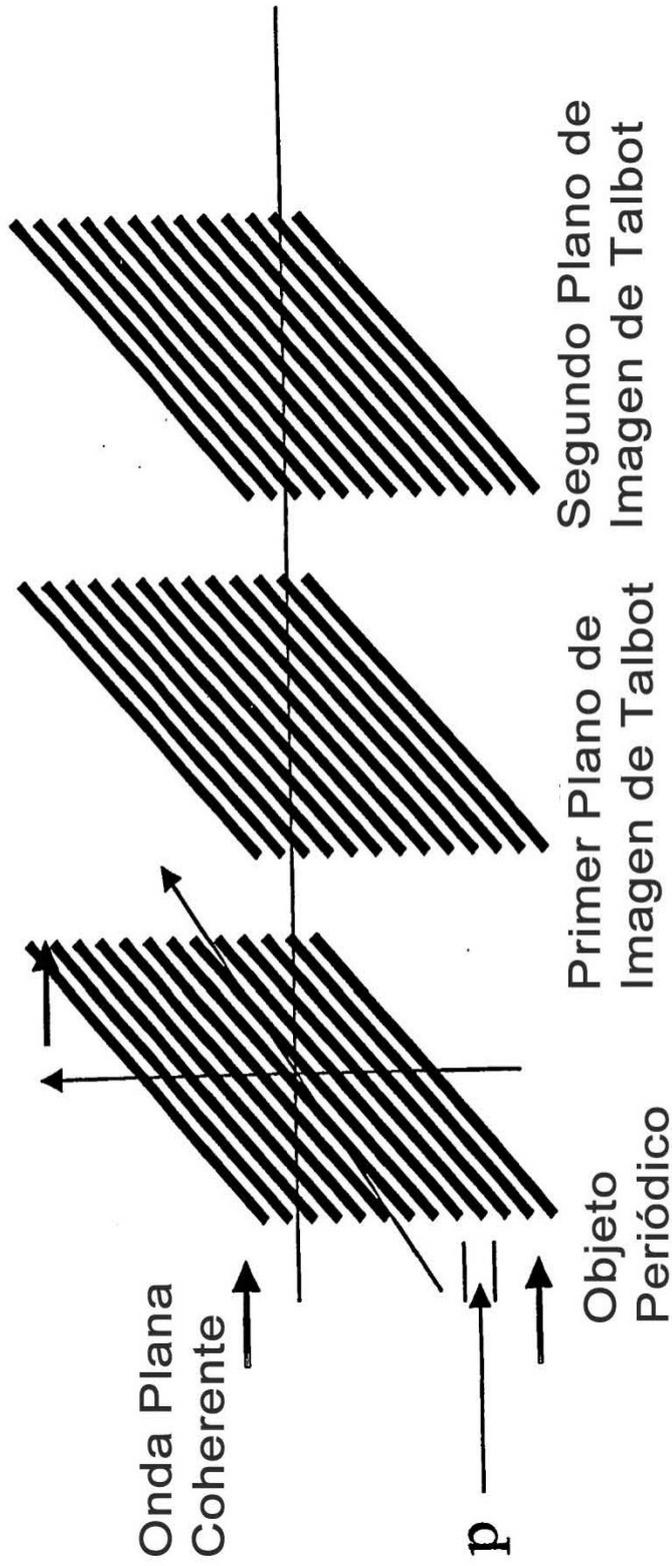


FIG. 2

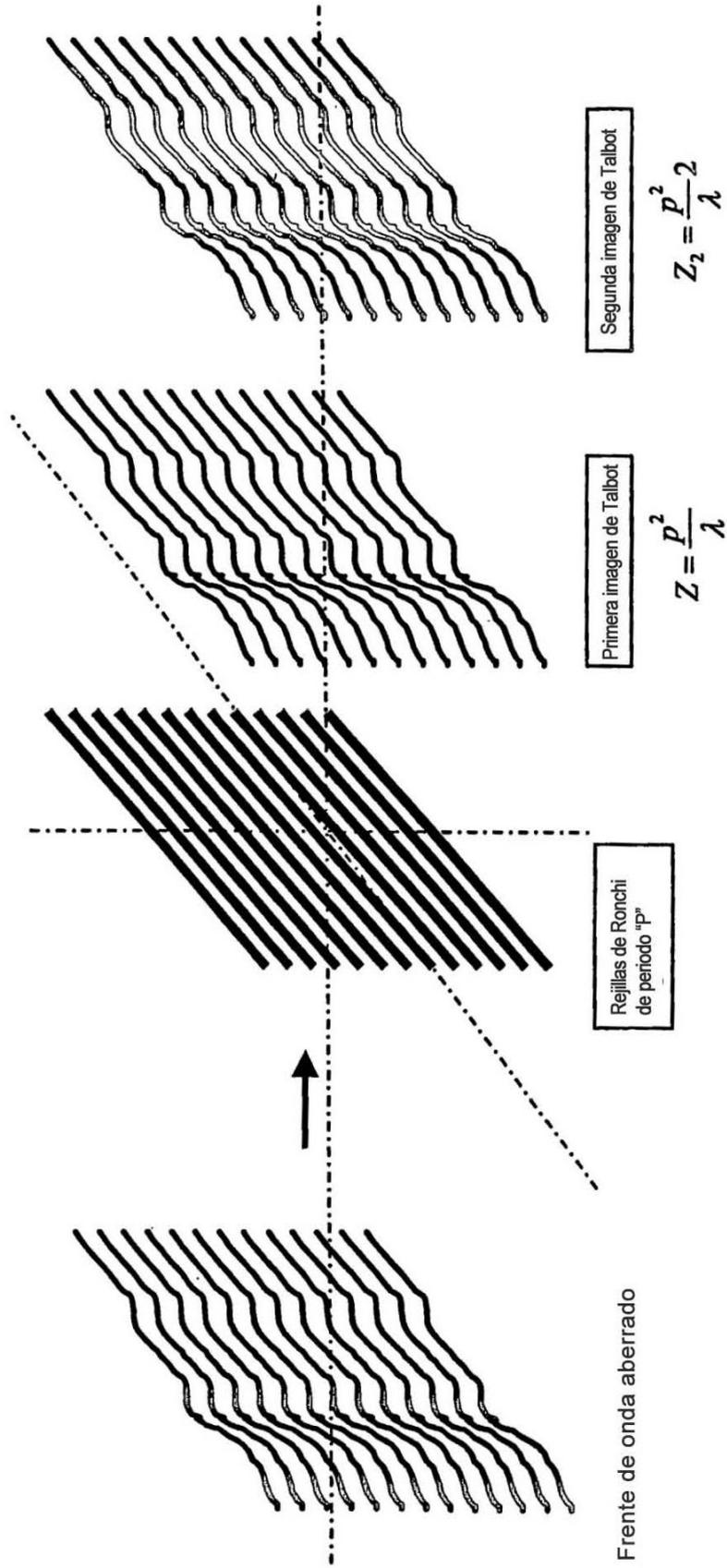


Figura 3

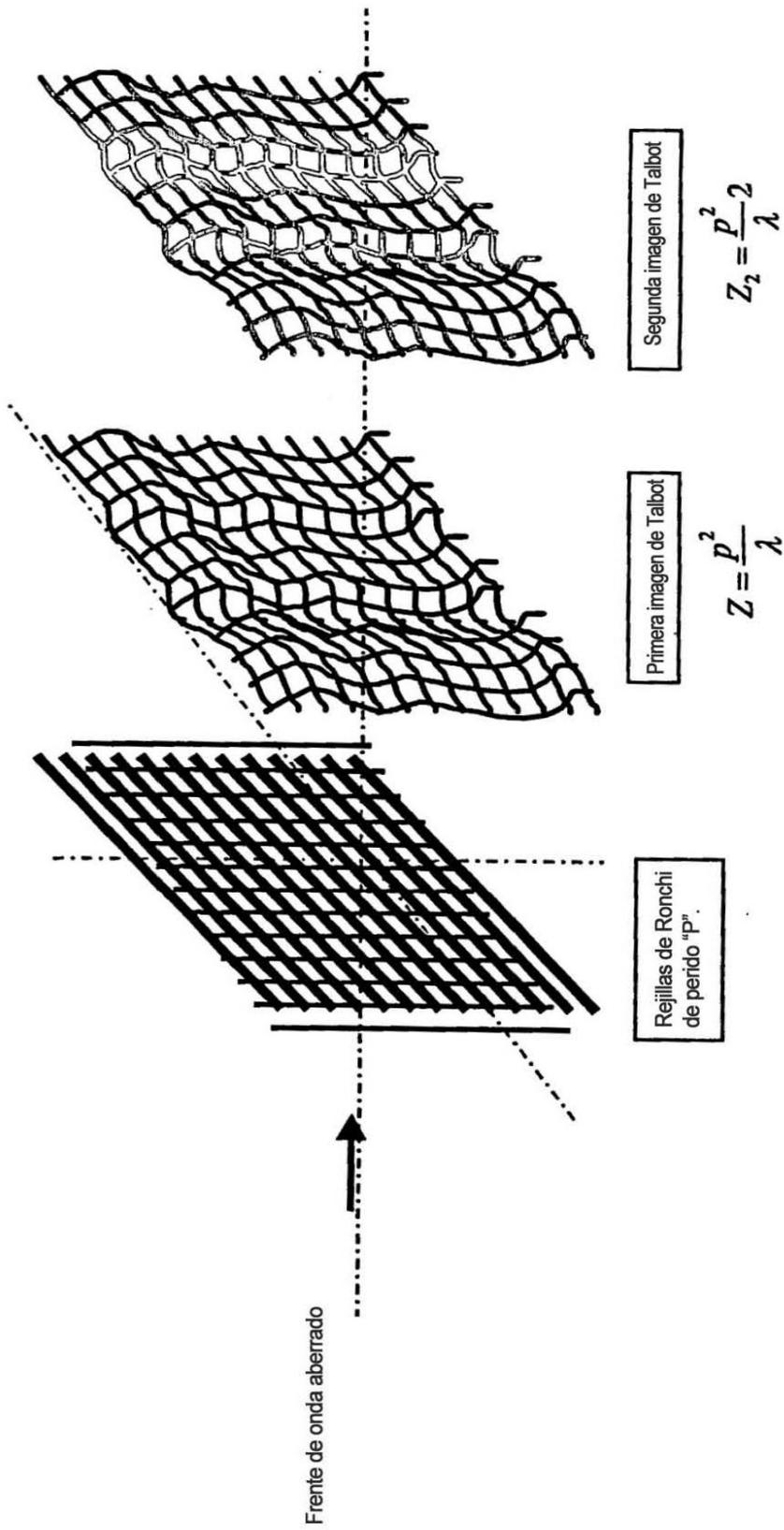
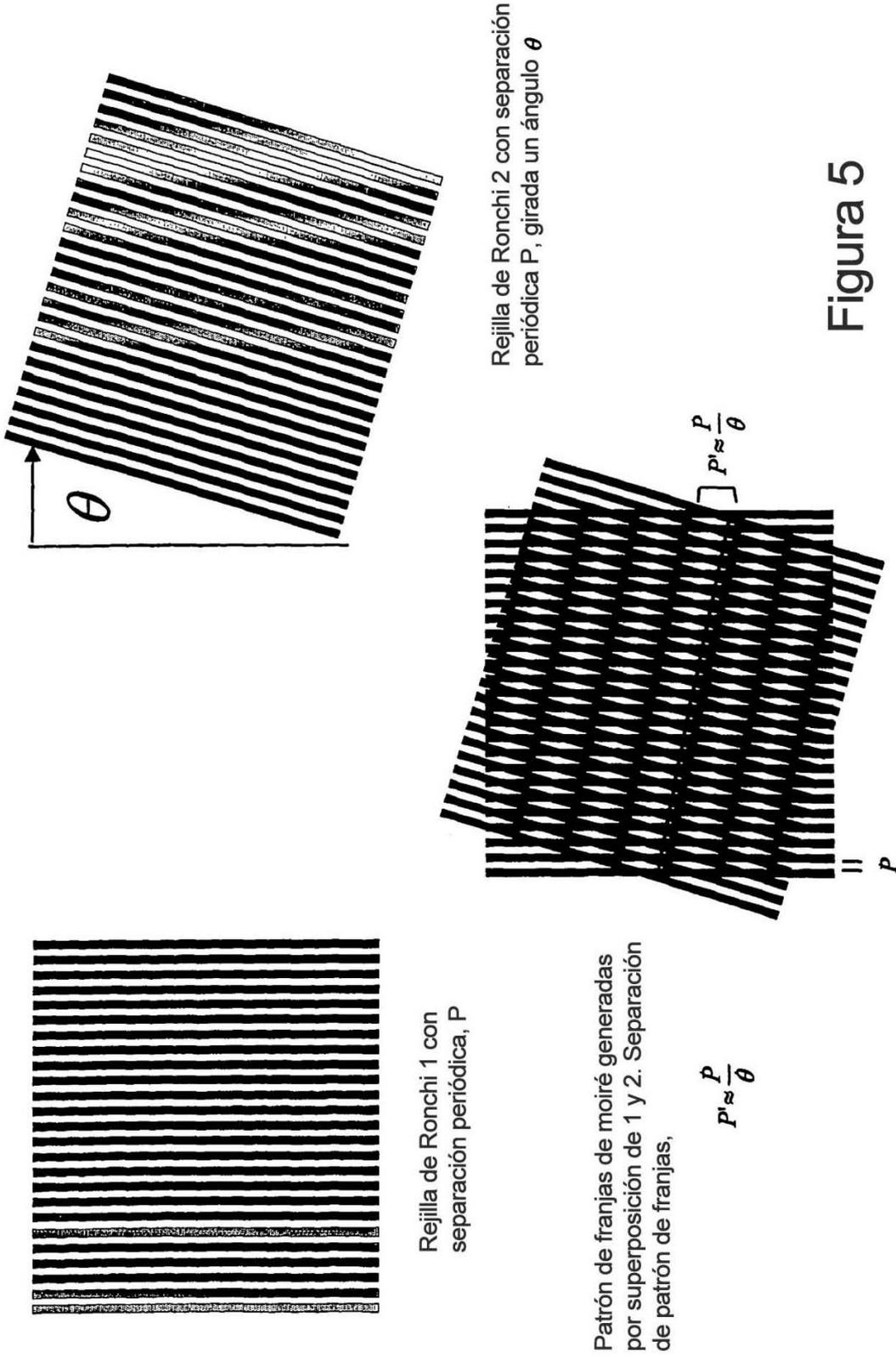


Figura 4



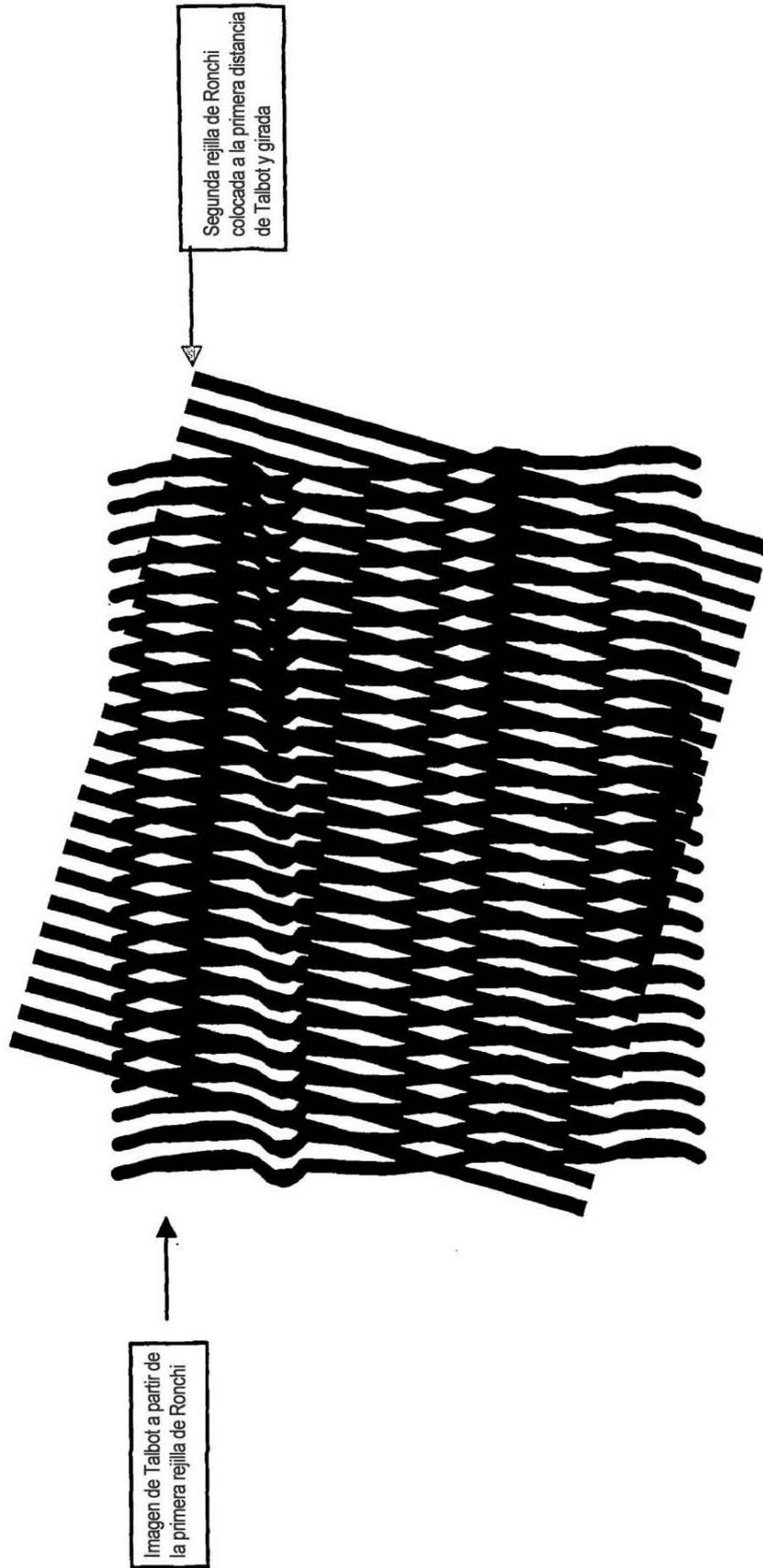


Figura 6

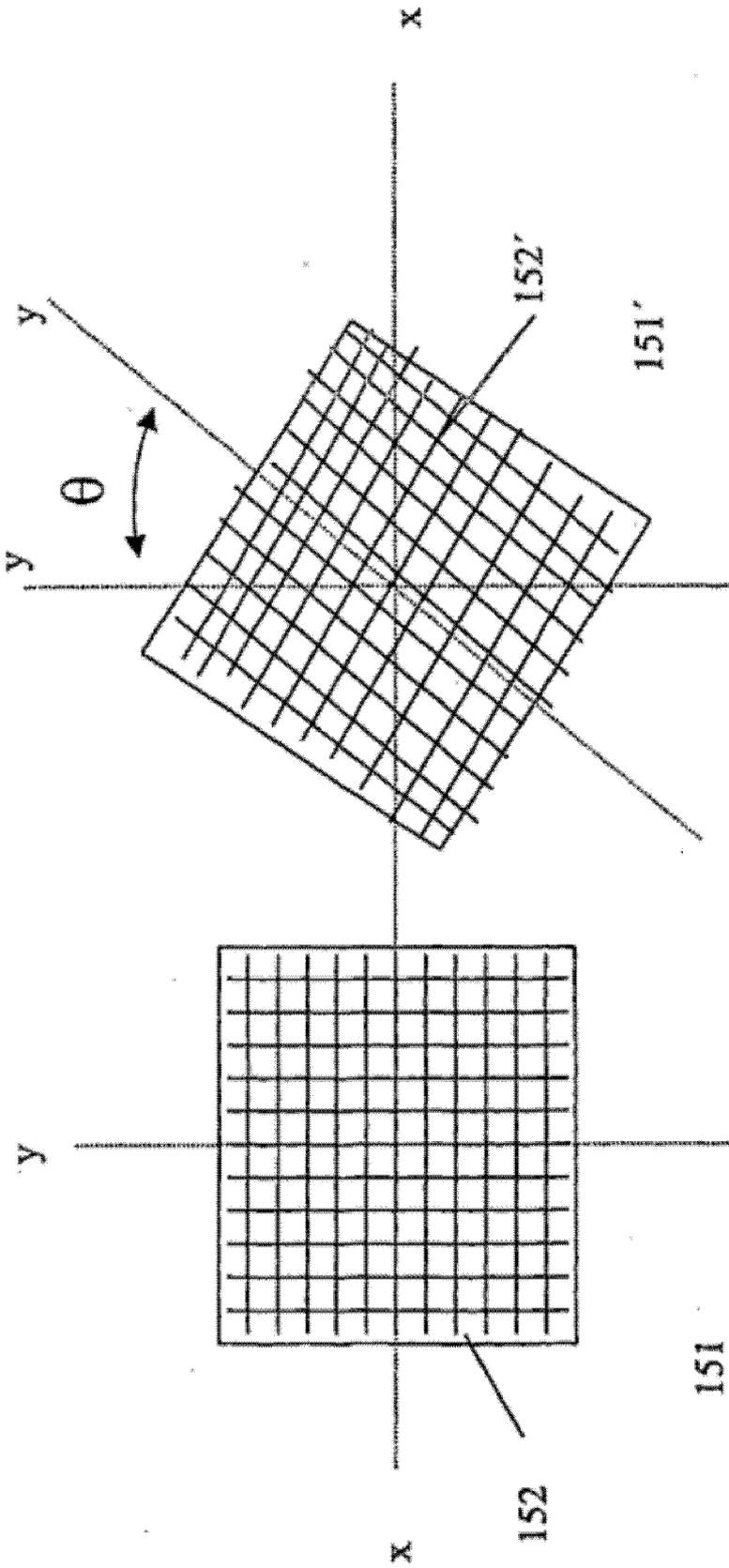


FIG. 7

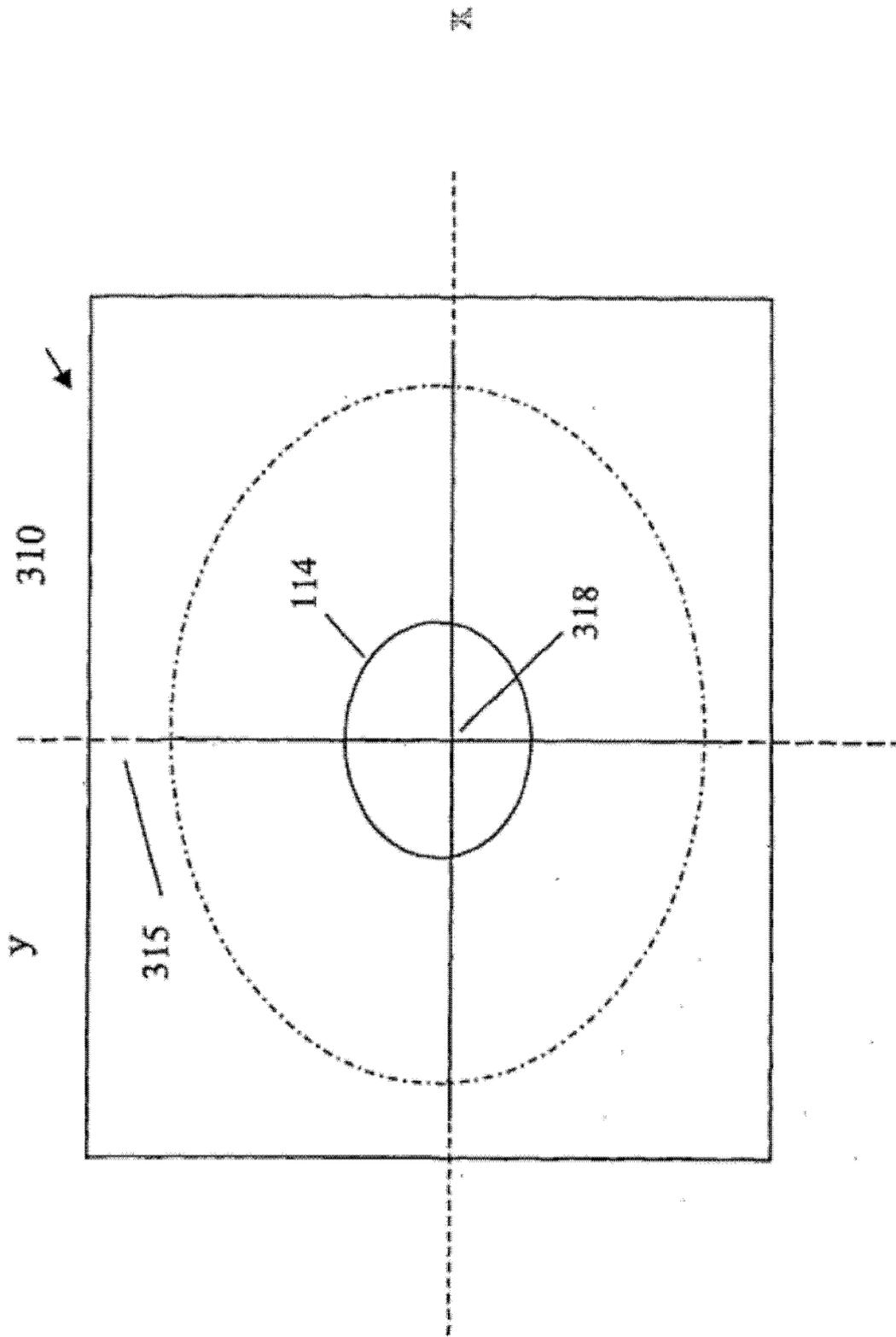


FIG. 8