

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 415 860**

51 Int. Cl.:

**A61B 3/107** (2006.01)

**G01B 11/25** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.11.2007** **E 07819676 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.03.2013** **EP 2227131**

54 Título: **Método para evaluar una superficie reconstruida y topógrafo corneal**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**29.07.2013**

73 Titular/es:

**VERENIGING VOOR CHRISTELIJK HOGER  
ONDERWIJS, WETENSCHAPPELIJK  
ONDERZOEK EN PATIËNTENZORG (100.0%)  
DE BOELELAAN 1105  
1081 HV AMSTERDAM, NL**

72 Inventor/es:

**DE PAZ SICAM, VICTOR ARNI;  
SNELLENBURG, JORIS-JOOST y  
VAN DER HEIJDE, GERRIT LUDOLPH**

74 Agente/Representante:

**SUGRAÑES MOLINÉ, Pedro**

**ES 2 415 860 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

Método para evaluar una superficie reconstruida y topógrafo corneal

5 Campo de la invención

Topografía corneal

Antecedentes

10 La medición de la forma corneal está convirtiéndose en un procedimiento común en la práctica oftalmológica. Se realiza mediante una técnica denominada queratoscopia. Esta técnica permite el estudio de la imagen corneal y las distorsiones de imagen interpretadas como una indicación de una topografía de la córnea anómala. En la queratoscopia se usan los siguientes elementos: una fuente de estimulador para iluminar una superficie objetivo (por ejemplo la córnea de un ojo) con un patrón de luz y un objetivo de imagen dispuesto para recibir la reflexión del patrón de luz. La información a partir de la reflexión se usa para reconstruir la forma corneal. Una de las fuentes de estimulador más usadas normalmente es el patrón de anillos de Plácido que consiste en un disco con anillos negros y blancos alternos. En los topógrafos modernos, la imagen reflejada de la superficie objetivo es capturada por una cámara y se aplican algoritmos informáticos para procesar esta información para reconstruir la forma corneal. Sin embargo, este procedimiento no está exento de problemas. Por ejemplo puede observarse que, cuando se reconstruye la superficie corneal, los algoritmos numéricos usados en topógrafos de discos de Plácido disponibles comercialmente desprecian las reflexiones de rayos oblicuos. Esto conduce a una imprecisión en la reconstrucción de superficies corneales que no presentan simetría rotacional. En la topografía de discos de Plácido, la forma corneal se reconstruye suponiendo que la reflexión se produce en un plano meridiano. Sin embargo, esta suposición es válida sólo si la superficie corneal presenta simetría rotacional. Para las superficies sin simetría rotacional, pueden producirse reflexiones de rayos oblicuos. Esto significa que en la topografía basada en Plácido, existe ambigüedad en la relación entre los puntos de fuente de estimulador y los puntos de imagen especialmente cuando la córnea no es una superficie con simetría rotacional. Esta ambigüedad puede superarse por ejemplo aplicando una fuente de estimulador que permite establecer una correspondencia uno a uno entre un punto sobre la fuente de estimulador y un punto sobre la imagen. Para topógrafos basados en Plácido, esto puede implementarse modificando el patrón de estimulador a por ejemplo un patrón de tablero de ajedrez. Además puede observarse que cuando se usa un patrón codificado con colores en lugar del patrón de Plácido, puede obtenerse una correspondencia similar entre puntos de fuente de estimulador y puntos de imagen y puede eliminarse la ambigüedad debida a rayos oblicuos.

35 Tal como se explicó anteriormente, los topógrafos que están disponibles actualmente proporcionan una reconstrucción de la superficie objetivo (por ejemplo la superficie corneal), usando algoritmos numéricos tales como ajuste de superficie usando *splines* o polinomios de Zerkine. Hasta ahora, se ha prestado poca atención al desarrollo de técnicas que permitan una evaluación fácil de la precisión de la superficie reconstruida. Una técnica conocida para evaluar la exactitud de algoritmos de reconstrucción de superficie se describe por Halstead *et al.* en *Optom. Vis. Sci.* 1995, Vol. 72, págs. 821-827. La superficie corneal reconstruida se evalúa calculando las normales de superficie de la superficie reconstruida y comparándolas con el ángulo bisector entre los rayos incidente y reflejado para cada par de punto de fuente y punto de imagen. Para la superficie correcta, estos dos vectores deben ser idénticos. Si ambos vectores no son idénticos, puede definirse un error residual que representa la diferencia entre los dos vectores. En el algoritmo descrito por Halstead, un residuo de ángulo (correspondiente a la diferencia entre la normal y el ángulo bisector) se calcula como error residual. El error residual puede usarse adicionalmente para mejorar la precisión de la superficie reconstruida por ejemplo mediante un ajuste de mínimos cuadrados. El documento "Reconstructing curved surfaces from specular reflection patterns using spline surface fitting of normals", M.A Halstead *et al.*, *Proceeding SIGGRAPH '96* pág. 335-342, da a conocer imágenes que representan la superficie reconstruida que se proporcionan mediante un cálculo junto con una superficie objetivo matemática. Sin embargo un inconveniente del método propuesto es que no proporciona una manera fácil de valorar la relevancia de la diferencia calculada entre la superficie (objetivo) real y la superficie reconstruida.

55 Objeto de la invención

Por tanto, un objeto de la presente invención es proporcionar un método para la evaluación de una superficie reconstruida que permite valorar la relevancia de la diferencia calculada entre la superficie (objetivo) real y la superficie reconstruida de manera fácil. Otro objeto de la presente invención es proporcionar un topógrafo corneal que permite la evaluación de una superficie reconstruida de manera fácil. Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar un método de calibración para un topógrafo corneal.

Otros objetos y ventajas de la presente invención resultarán evidentes a partir de la descripción en la que se describen realizaciones de la presente invención.

65 Sumario de la invención

Según un aspecto de la invención, se proporciona un método para evaluar una correspondencia entre una superficie objetivo que comprende una superficie corneal y una superficie reconstruida que representa la superficie objetivo, según la reivindicación 1.

5 Aplicando este método, la precisión de la superficie reconstruida puede valorarse más fácilmente debido a la visualización del error residual junto con la imagen. Al mostrar el error residual sobre el objetivo de imagen, puede valorarse también qué partes de la superficie reconstruida experimentan el error (o error residual) más grande y qué partes tienen un error pequeño. Esto puede ser importante en caso de que el requisito de precisión de la superficie reconstruida no sea uniforme. Como ejemplo, puede hacerse referencia a la reconstrucción de una superficie corneal usando un topógrafo corneal. En un aparato de este tipo, se determina una reconstrucción de una superficie corneal (por ejemplo usando un algoritmo numérico), la superficie reconstruida va a usarse adicionalmente en un procedimiento quirúrgico posterior para ajustar la córnea de un paciente por ejemplo usando tecnología láser. Estará claro para el experto que, para que este procedimiento tenga éxito, la precisión de la superficie reconstruida es importante y debe verificarse. Al visualizar la imagen reflejada del objetivo (por ejemplo la superficie corneal), junto con los errores residuales, la precisión de la superficie reconstruida puede valorarse mediante inspección visual. Esta inspección visual puede usarse también para determinar cualquier etapa adicional que deba adoptarse para por ejemplo modificar la superficie reconstruida para reducir la discrepancia entre la superficie (objetivo) real y la superficie reconstruida. Obsérvese que puede aplicarse cualquier método o dispositivo adecuado para mostrar el error residual junto con la imagen reflejada. Ambos pueden mostrarse por ejemplo en una pantalla que recibe su entrada desde una cámara CCD, sirviendo la cámara como objetivo de imagen para recibir la imagen reflejada desde la superficie objetivo. Obsérvese que el objetivo de imagen puede ser cualquier dispositivo de grabación o recepción de imágenes (o fotos) tal como una cámara CCD o una cámara de vídeo. La superficie objetivo representa en general el objeto que se examina, en caso de que el método se aplique para examinar el ojo de un paciente, la superficie objetivo puede ser, por ejemplo, la córnea de dicho ojo.

Según otro aspecto de la presente invención, se proporciona un topógrafo corneal según la reivindicación 7.

30 Un topógrafo corneal según la presente invención difiere de los topógrafos convencionales en que permite entre otras cosas mostrar un error residual calculado a partir de una comparación entre una superficie real (por ejemplo una superficie corneal) y una superficie reconstruida junto con la imagen reflejada desde la superficie objetivo. Por ejemplo ambas cosas pueden mostrarse juntas en una pantalla del topógrafo. Tal como se describió anteriormente, tal inspección visual, que está disponible fácilmente, proporciona una manera fácil de valorar la precisión de la reconstrucción, también puede ser una herramienta útil a la hora de decidir si se requiere o no un ajuste de la superficie reconstruida.

El método según la invención, puede estar precedido por un método de calibración, que comprende las etapas de

- 40 - identificar un punto de imagen de referencia sobre una imagen generada reflejando una fuente de estimulador sobre una superficie de referencia hacia un objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia,
- 45 - calcular las coordenadas del punto de origen de estimulador del punto de imagen de referencia mediante trazado inverso desde el punto de imagen hacia la superficie de referencia y desde la superficie de referencia hacia la fuente de estimulador,
- establecer la relación geométrica entre el punto de imagen de referencia y el punto de origen de estimulador.

50 Para que un topógrafo corneal proporcione una superficie reconstruida precisa de, por ejemplo, una superficie corneal, un topógrafo corneal tiene que estar calibrado; tiene que conocerse la posición relativa entre los diferentes componentes del topógrafo. Como ejemplo, los algoritmos de reconstrucción de superficie pueden depender de que se conozca la posición de la fuente de estimulador en relación con el objetivo de imagen. En caso de que esta posición relativa no se conozca o no sea lo suficientemente precisa, puede aplicarse el método de calibración según la invención. Como tal, pueden resolverse imprecisiones o errores que se producen durante una calibración inicial por el fabricante. La superficie de referencia para su uso con el método de calibración puede ser, por ejemplo, una superficie sustancialmente esférica que tiene una geometría conocida. La superficie de referencia puede ser también una superficie corneal de un ojo del que se conocen las propiedades geométricas.

Breve descripción de las figuras

60 La figura 1 representa esquemáticamente el principio básico de la topografía corneal;

la figura 2 representa esquemáticamente un topógrafo corneal que permite una correspondencia uno a uno entre un punto de estimulador y un punto de imagen;

65

la figura 3 representa esquemáticamente el principio de trazado de rayos inverso tal como se aplica en una realización de la presente invención;

5 la figura 4 representa esquemáticamente el principio de pseudotrazado de rayos directo tal como se aplica en una realización de la presente invención.

#### Figuras

10 La figura 1 representa esquemáticamente una parte de una fuente de estimulador 100 dispuesta para iluminar una superficie objetivo 110 (el objetivo puede ser, por ejemplo, un ojo). El rayo de luz que emana de la fuente de estimulador se refleja sobre la superficie objetivo, el rayo de luz reflejado se recibe por el objetivo de imagen 120 que puede ser, por ejemplo, una cámara CCD. Entre la superficie objetivo y el objetivo de imagen, puede estar presente una lente 130. En general, cuando la fuente de estimulador no comprende puntos de características diferenciadas, no es posible establecer una relación uno a uno entre un punto sobre la fuente de estimulador y la proyección correspondiente sobre la imagen. La figura 2 representa esquemáticamente una disposición que permite esta correspondencia. La figura 2 representa esquemáticamente una parte de la fuente de estimulador 200 dispuesta para iluminar una superficie objetivo 210. La parte de la fuente de estimulador 200 tal como se muestra comprende un patrón de formas rectangulares. Las diferentes partes o formas de la fuente de estimulador pueden emitir, por ejemplo, un color diferente. Alternativamente, el patrón puede ser un patrón alterno de formas claras y oscuras. Al hacer esto, puede obtenerse una correspondencia uno a uno entre la fuente de estimulador y la imagen para los denominados cruces (en la fuente de estimulador tal como se representa, el cruce corresponde al punto en el que se tocan los cuatro rectángulos) en la fuente de estimulador. En la figura 2, el cruce (también denominado como cruce de estimulador SC) se indica mediante el número de referencia 220. Puesto que el patrón de la fuente de estimulador se refleja sobre la superficie objetivo y se proyecta sobre el objetivo de imagen, estará claro para el experto que un punto de imagen 230 correspondiente al cruce de estimulador puede encontrarse sobre la imagen 240. Este punto de imagen se denomina también cruce detectado DC.

El que pueda establecerse o no una correspondencia uno a uno de este tipo entre varios puntos de fuente de estimulador y puntos de imagen correspondientes depende de si el patrón de fuente de estimulador comprende o no cruces de estimulador que puedan dar como resultado cruces identificables sobre los objetivos de imagen. Los topógrafos que permiten una correspondencia uno a uno de este tipo son, por ejemplo, topógrafos que proyectan un patrón de tablero de ajedrez, o un patrón de diana o un patrón codificado con colores.

35 Basándose en las propiedades geométricas de la fuente de estimulador, es decir la posición de la fuente en relación con la superficie objetivo, y la imagen sobre el objetivo de imagen, puede establecerse una reconstrucción de la superficie objetivo. Existen diferentes maneras de lograr una superficie reconstruida de este tipo, tal como un ajuste de curvas usando polinomios de Zerkine o un ajuste usando funciones *spline*.

40 Una vez establecida una superficie reconstruida de este tipo (por ejemplo como una función continua que describe la altura de la córnea, o la desviación en altura con respecto a una superficie esférica), esto puede aplicarse por un cirujano para ajustar la forma de la córnea de un paciente, por ejemplo usando procedimientos de cirugía refractiva láser. Estará claro que en un procedimiento de este tipo, el resultado puede depender en gran medida de la correspondencia entre la superficie real objetivo (es decir la córnea de un ojo) y la superficie reconstruida.

45 En caso de que el topógrafo permita establecer una correspondencia uno a uno de este tipo para varios puntos característicos (o cruces), esto puede aplicarse para verificar la precisión de una superficie reconstruida. Una manera de verificar la precisión de la superficie reconstruida es usar un algoritmo de trazado inverso para trazar inversamente el origen de un punto de imagen hasta la fuente de estimulador usando la superficie reconstruida. Este procedimiento se ilustra en la figura 3. La figura 3 muestra esquemáticamente una fuente de estimulador 300 y un objetivo de imagen 310 de un topógrafo corneal. También se indica en la figura 3 un cruce de estimulador 330 y su cruce detectado 340 correspondiente (es decir la ubicación sobre el objetivo de imagen en la que terminaría un rayo de luz (indicado por la línea discontinua 350) que emana desde el cruce de estimulador 320 y reflejado sobre la superficie objetivo) sobre el objetivo de imagen 310. Obsérvese que la forma real de la superficie objetivo 320 se indica mediante la línea discontinua 360. Cuando se establece el cruce detectado 330, puede trazarse hasta el punto correspondiente (SC) sobre el estimulador por medio de trazado de rayos inverso. En este procedimiento, un rayo se traza inversamente desde un punto sobre la imagen a través del punto nodal de la lente 370 hasta la superficie objetivo reconstruida (indicada por la línea continua 380) de la superficie objetivo 320. El punto de intersección 390 sobre la superficie reconstruida puede calcularse, en general, porque la superficie está representada por una función analítica, por ejemplo como combinación de polinomios de Zerkine. La exactitud de la superficie reconstruida puede evaluarse comparando el bisector del rayo incidente y el rayo de reflexión con el vector normal sobre el punto de intersección. Una diferencia entre los dos vectores (también denominada como residuo de ángulo) es una medida del error entre la superficie real y la superficie reconstruida. En general, cualquier diferencia entre la trayectoria real de un rayo de luz que emana desde la fuente de estimulador y su rayo trazado inversamente a través de la superficie reconstruida, puede usarse como medida que indica la precisión de la superficie reconstruida. Tal diferencia se denomina error residual.

El error residual y la imagen reflejada se muestran juntos. Esto proporciona una manera fácil de que por ejemplo un cirujano valore la precisión de la superficie reconstruida y, si se requiere, adopte las medidas apropiadas para mejorar la superficie reconstruida.

Según una realización de la presente invención, el error residual comprende un error residual de ángulo calculado mediante el trazado inverso del punto de imagen de referencia hacia la superficie reconstruida y desde la superficie reconstruida hacia la fuente de estimulador. El error residual de ángulo puede calcularse, por ejemplo, tal como se indicó anteriormente.

Según otra realización de la presente invención, se emplea un método alternativo para verificar la exactitud del procedimiento de reconstrucción de superficie. El procedimiento se denomina rutina de pseudotrazado de rayos directo (PFRT). El procedimiento tal como se describe en la figura 3 se denomina algoritmo de trazado inverso porque un punto de imagen (el cruce detectado) se traza inversamente y se compara con su punto de origen. Un algoritmo de trazado de rayos directo trazaría el cruce de estimulador hasta la imagen, sin embargo, como hay infinitos rayos que emanan desde el cruce de estimulador, el trazado de rayos directo desde este punto hasta la superficie corneal sería imposible. Para superar esto, el método alternativo según una realización de la presente invención aplica múltiples procedimientos de trazado de rayos inverso. Según una realización del método, se considera una zona alrededor de cada DC sobre el objetivo de imagen (en caso de que el objetivo de imagen sea un plano de cámara CCD, la zona seleccionada puede ser, por ejemplo, una zona cuadrada de un número predefinido de píxeles, por ejemplo 11 x 11 píxeles). En una disposición de este tipo, cada píxel en esta zona se traza inversamente hasta la fuente de estimulador usando un algoritmo de trazado inverso (tal como se muestra por ejemplo en la figura 3). El píxel con la proyección más próxima al SC se considera la ubicación de píxel del denominado cruce de error residual RC. La distancia entre el cruce de error residual RC y el cruce detectado DC sobre el plano de imagen puede considerarse una medida de la precisión de la superficie reconstruida (es decir, esta distancia puede considerarse un error residual). Una visualización de este procedimiento se muestra en la figura 4. En esta figura, se muestran 5 puntos de píxel (400) sobre el plano de imagen 410: el DC (420) y 4 puntos de píxel en los alrededores del DC. Cuando se traza inversamente, se encuentra que el píxel 430 tiene la proyección más próxima (440) al SC 450 sobre la fuente de estimulador 460. Por tanto, se considera el píxel 430 como el cruce de error residual RC. Obsérvese que, por claridad, ni la distancia entre los píxeles, ni la distancia a la superficie objetivo o fuente de estimulador están a escala con respecto a la superficie objetivo. Obsérvese también que la superficie reconstruida que se usa para el trazado inverso de los diferentes píxeles no se muestra de manera separada en la figura 4.

Tal como resultará evidente, el método propuesto proporciona igualmente la posibilidad de mostrar información de error residual acerca de la precisión de la superficie reconstruida junto con la imagen reflejada. Una evaluación en pantalla de este tipo del error residual (o información de error residual) junto con la imagen permite una valoración fácil de la superficie reconstruida. Puesto que la información de error residual puede mostrarse junto con la imagen reflejada de, por ejemplo, el ojo del paciente, puede valorarse si la imagen reconstruida es o no lo suficientemente precisa, basándose en la magnitud del error (medido por ejemplo en número de píxeles) y la ubicación del error.

Respecto a este último aspecto, estará claro para el experto que un determinado error de la superficie reconstruida puede ser aceptable en determinadas ubicaciones de la córnea mientras que el mismo error es inaceptable en otras ubicaciones. El método de evaluación propuesto proporciona por tanto la posibilidad de valorar fácilmente en qué áreas la superficie reconstruida necesita una mejora adicional.

Una ventaja adicional del método propuesto es que la amplitud del error (por ejemplo la distancia en píxeles entre el cruce de error residual RC y el cruce detectado DC se encuentra que es proporcional a la precisión de altura corneal. Dependiendo, entre otras cosas, del tamaño de píxel, puede establecerse la relación entre el error en una determinada ubicación sobre el plano de imagen (expresado en píxeles) y la precisión de altura (es decir la distancia entre la superficie (corneal) real y la superficie recomputarizada en una dirección perpendicular a la superficie) en esa ubicación. Como ejemplo, un error de por ejemplo un píxel puede corresponder a un error de altura de 1 micrómetro. Basándose en esta relación, el método alternativo propuesto proporciona una posibilidad adicional de valorar fácilmente si un determinado error es aceptable o no.

Según aún una realización adicional de la presente invención, la información de error residual obtenida mediante el algoritmo PFRT (tal como se indica en la figura 4) o el algoritmo de trazado inverso (tal como se explica en la figura 3) se usa para mejorar adicionalmente la precisión de la superficie reconstruida. Como tal, el método para evaluar la correspondencia entre una superficie objetivo y una superficie reconstruida que representa la superficie objetivo puede comprender la etapa de modificar la superficie reconstruida basándose en el error residual calculado.

Como ejemplo, se supone que la superficie objetivo se reconstruye usando los conocidos polinomios de Zerkine. Una combinación de estos polinomios (es decir una suma de los diferentes polinomios ponderada multiplicando cada polinomio por un coeficiente de Zernike correspondiente) puede usarse para representar la superficie objetivo (por ejemplo la altura de una córnea) como una función analítica. Los coeficientes requeridos para la ponderación de los

polinomios de Zerkine pueden obtenerse por ejemplo a partir de una rutina de ajuste de mínimos cuadrados. Debido a que inicialmente la superficie es desconocida, los coeficientes de Zerkine iniciales pueden ajustarse iguales a cero, describiendo una superficie plana. Para cada cruce detectado sobre la imagen, puede calcularse un residuo de ángulo como la diferencia entre un vector normal (en el punto de intersección) y un ángulo bisector entre el rayo incidente y reflejado, véase la figura 3. Entonces los residuos de ángulo (o errores residuales) calculados pueden usarse en un procedimiento de ajuste de mínimos cuadrados para determinar un modelo mejor para la superficie.

Tal como estará claro para el experto, el error residual de los cruces detectados tal como se obtiene a partir del algoritmo PRFT puede aplicarse igualmente en una rutina de ajuste de mínimos cuadrados para obtener una superficie mejorada. En comparación con el uso de los residuos de ángulo en una rutina de optimización (o mejora adicional), el uso de los errores residuales del algoritmo PRFT proporciona las siguientes ventajas:

- puesto que existe una relación conocida entre el error residual (por ejemplo expresado en número de píxeles o tamaño de píxel) y la precisión de altura (tal como se explicó anteriormente), los errores residuales calculados pueden usarse para determinar si el proceso de optimización puede detenerse o si se requiere una iteración adicional. En caso de que los valores de error residual estén por debajo de un determinado valor, puede determinarse fácilmente la precisión de altura correspondiente. Alternativamente, puede requerirse una determinada precisión de altura (por ejemplo un error de altura corneal inferior a un 1 micrómetro) y determinarse el valor de error residual admisible correspondiente. Este valor puede usarse en el procedimiento de optimización de superficie como criterio para detener o continuar el procedimiento.

- puesto que el algoritmo PRFT proporciona también información en cuanto a dónde se producen los errores sobre la superficie corneal, puede aplicarse una función de ponderación a los errores residuales de manera que una mejora en la siguiente iteración se centre en las áreas en las que un error es menos aceptable.

Puede observarse además que una función de ponderación de este tipo puede aplicarse también para suprimir la contribución de errores residuales grandes (principalmente valores atípicos) en el procedimiento de ajuste.

El método PFRT tal como se describió anteriormente se ha aplicado a mediciones de cinco superficies diferentes:

(1) una superficie esférica de PMMA (polimetilmetacrilato) con 6,99 mm de radio de curvatura.

(2) una superficie esférica de PMMA con 9,00 mm de radio de curvatura.

(3) una superficie tórica de PMMA con radio de curvatura axial máximo de 8,02 mm y radio de curvatura axial mínimo de 7,05 mm.

(4) una córnea humana, del ojo izquierdo de un hombre de 38 años, sin anomalías conocidas, y (5) una córnea humana, del ojo izquierdo de un hombre de 61 años, con infiltrado subepitelial.

Tal como se describe, el método PFRT puede producir información de error residual en unidades de píxel de la superficie reconstruida sobre la propia imagen (por ejemplo una imagen de CCD). Para producir una descripción precisa de la superficie corneal, deben suceder dos cosas. En primer lugar, la ubicación de los cruces de imagen (cruces detectados DC) debe determinarse de manera precisa. En segundo lugar, la reconstrucción numérica de la superficie corneal debe concordar con los DC. La salida de la rutina PFRT es un indicador de si el segundo procedimiento se implementó bien. Estará claro para el experto que la precisión del primer procedimiento (que obtiene la posición de los cruces detectados DC) es importante para obtener una salida fiable del procedimiento PFRT o cualquier otro método de evaluación. A este respecto, puede hacerse referencia a Spoelder HJW, Vos FM, Petriu EM, Groen FCA. *Some aspects of pseudo random binary array based surface characterization*. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2000;49:1331-6 que muestra que puede obtenerse una precisión de subpíxel al detectar la ubicación de los cruces de imagen DC. En el caso en el que 1 píxel corresponda a una precisión de altura de 1 micrómetro, el procedimiento PFRT puede dar como resultado una precisión de altura corneal de inferior al micrómetro cuando la optimización continúa hasta que los errores residuales calculados sean inferiores a 1 píxel. A este respecto, merece la pena mencionar que la precisión que puede obtenerse depende también de la complejidad de la superficie real combinada con los grados de libertad de la función de ajuste de superficie. Se ha mostrado que el error residual global (o error residual medio de los cruces detectados) aumenta con la complejidad de la superficie medida. Los errores residuales se encontraron que son los más pequeños para las superficies artificiales; las superficies esféricas (1) y (2) dieron como resultado un error residual medio de 0,70 píxel, la superficie tórica (3) dio como resultado un error residual promedio de 0,81 píxel. La córnea regular (4) se encontró que tiene un error residual ligeramente mayor en comparación con las superficies artificiales (un error residual promedio de 1,16 píxel). Este efecto se encuentra que está provocado por el efecto de características de forma de orden superior. Sin embargo, debido a que estas características de forma no son tan dominantes en comparación con las características de forma esférica y tórica, el efecto sobre el error residual se encontró que es relativamente pequeño. Por otro lado, para la córnea irregular (5), el efecto de las características de forma de orden superior es mayor, produciendo por tanto un aumento en el valor promedio del error residual (se encontró un error residual promedio de 2,94 píxel cuando la

superficie se modeló usando polinomios de Zerkine de hasta orden radial 6). La precisión de la reconstrucción de superficie se encontró que mejora cuando se aumenta el orden radial de Zernike usado para modelar la superficie corneal. La adición de más componentes de Zernike permite un mejor ajuste de las características de superficie locales. Para las superficies artificiales, un orden radial inferior para la expansión de Zernike (orden 6) es suficiente para reconstruir la superficie con precisión de subpíxel. Para la córnea regular, se observó precisión de subpíxel sólo para el orden radial de Zernike de 10 o superior. Para la córnea irregular (5), se encontró que el orden 20 no era suficiente todavía para producir precisión de subpíxel para la reconstrucción de superficie. No obstante, con este orden se encontró que la precisión se aproximaba a la resolución de píxel, que es razonablemente suficiente para la práctica clínica. Lo anterior indica también que, hasta cierto punto, el uso de polinomios de Zerkine producirá una reconstrucción de superficie corneal precisa siempre que se use un orden radial suficiente.

Debe observarse que la rutina PRFT tal como se describe no depende de la manera en que se realiza la reconstrucción de la superficie. Estará claro para el experto que puede aplicarse cualquier procedimiento de ajuste de superficie para proporcionar una superficie reconstruida. Esta superficie reconstruida puede evaluarse entonces usando la rutina PFRT tal como se describe y/o puede optimizarse adicionalmente usando el resultado de la rutina PFRT (es decir la información de error residual).

Según una realización de la presente invención, se proporciona en un topógrafo corneal que permite una evaluación de una superficie reconstruida tal como se describió anteriormente. Para ello, el topógrafo corneal comprende una unidad computacional dispuesta para

- construir una superficie reconstruida que representa la superficie objetivo procesando información de la fuente de estimulador del topógrafo y la imagen recibida sobre el objetivo de imagen del topógrafo,

- identificar un punto de imagen de referencia sobre el objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia sobre la fuente de estimulador,

- calcular para el punto de imagen de referencia, usando la superficie reconstruida, un error residual que representa la correspondencia entre la superficie objetivo y la superficie reconstruida,

- mostrar el error residual junto con la imagen reflejada.

Tal como estará claro a partir lo anterior, pueden aplicarse diversas maneras de determinar la superficie reconstruida o el error residual en una unidad computacional de este tipo. Puede observarse además que, para identificar un punto de imagen de referencia sobre el objetivo de imagen del topógrafo correspondiente a un punto de estimulador de referencia sobre la fuente de estimulador del topógrafo, pueden aplicarse diversos tipos de fuentes de estimulador. Ejemplos de tales fuentes de estimulador son las fuentes que proporcionan un patrón de luz de tablero de ajedrez (o diana) o a patrón de luz codificado con colores. Un patrón de este tipo puede obtenerse aplicando diferentes valores de tono para las diferentes áreas del patrón, o un brillo o intensidad diferente. Un patrón codificado con colores puede compararse con un tablero de ajedrez en el que se usan áreas de diferentes colores como alternativa o además de las áreas que son negras o blancas (es decir oscuridad y claridad). Las diversas áreas de diferentes colores pueden estar dispuestas de tal manera que un punto de imagen de referencia sobre el objetivo de imagen del topógrafo correspondiente a un punto de estimulador de referencia sobre la fuente de estimulador del topógrafo pueda encontrarse más fácilmente.

El método según la presente invención puede estar precedido por un método de calibración. Tal como se explicó anteriormente, una construcción precisa de la superficie reconstruida se basa en el conocimiento preciso de la posición relativa de la fuente de estimulador y el objetivo de imagen. Para obtener este conocimiento, el topógrafo puede usarse con una superficie de referencia como superficie objetivo, en lugar de una superficie desconocida. Suponiendo que se conoce la geometría de la superficie de referencia, se conoce también una superficie reconstruida correspondiente. Aplicando cualquiera de las rutinas de trazado tal como se explicó anteriormente sobre una superficie de este tipo, se obtendrá como resultado un error residual sustancialmente igual a cero. Si se encuentra un error residual distinto de cero, esto significa que la suposición inicial respecto a la relación geométrica entre la fuente de estimulador y el objetivo de imagen era incorrecta. Como la superficie reconstruida correspondiente proporciona una representación precisa de la superficie de referencia, el trazado de rayos inverso del punto de imagen de referencia hacia la fuente de estimulador (a través de la superficie reconstruida) permite determinar las coordenadas reales del punto de estimulador de referencia (en relación con el objetivo de imagen). Como tal, puede establecerse la posición real del punto de estimulador de referencia en relación con el punto de imagen de referencia correspondiente. Estará claro para el experto que para obtener la posición relativa entre la fuente de estimulador y el objetivo de imagen en todos los 6 grados de libertad, la calibración puede realizarse para una pluralidad de puntos de estimulador de referencia.

Aunque los ejemplos que se describen se refieren en particular a la topografía corneal, puede afirmarse que los métodos que se describen (o bien el método de calibración o bien el método para evaluar una superficie reconstruida) pueden aplicarse también en otro campo de tecnología en el que se requiera el conocimiento preciso

de la forma de una superficie objetivo. Un ejemplo de un campo de este tipo es la tecnología de semiconductores en la que se requiere un conocimiento preciso de las características de superficie de un sustrato (tal como una oblea). Otro campo en el que los métodos descritos pueden aplicarse es la identificación biométrica usando por ejemplo un escáner de iris.

5 Puede afirmarse además que el método para evaluar la correspondencia entre una superficie objetivo y una superficie reconstruida que representa la superficie objetivo puede combinarse ventajosamente con el método de calibración tal como se ha descrito. Puesto que el método de calibración permite una determinación precisa de la  
10 relación geométrica entre los diversos componentes del topógrafo, puede ser ventajoso aplicar esta calibración antes del método de evaluación de superficie reconstruida ya que la relación geométrica entre la fuente de estimulador y el objetivo de imagen se usa para determinar la superficie reconstruida.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para evaluar una correspondencia entre una superficie objetivo que comprende una superficie corneal y una superficie reconstruida que representa la superficie objetivo, construyéndose la superficie reconstruida procesando información obtenida iluminando la superficie objetivo con un patrón de luz de una fuente de estimulador, y capturando una imagen reflejada del patrón de luz sobre un objetivo de imagen, comprendiendo el método las etapas de
  - determinar un punto de imagen de referencia sobre el objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia sobre la fuente de estimulador,
  - calcular, para el punto de imagen de referencia, usando la superficie reconstruida, un error residual que representa la correspondencia entre la superficie objetivo y la superficie reconstruida,
  - mostrar el error residual junto con la imagen reflejada de la superficie objetivo que comprende la superficie corneal,
  - evaluar la correspondencia entre la superficie objetivo y la superficie reconstruida a partir del error residual mostrado.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el error residual comprende un error residual de ángulo calculado mediante el trazado inverso del punto de imagen de referencia hacia la superficie reconstruida y desde la superficie reconstruida hacia la fuente de estimulador.
3. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de calcular el error residual comprende las etapas de
  - calcular una pluralidad de puntos de estimulador correspondientes a una pluralidad de puntos de imagen cerca del punto de imagen de referencia mediante el trazado inverso de los puntos de imagen hacia la superficie reconstruida y desde la superficie reconstruida hacia la fuente de estimulador,
  - seleccionar el punto de imagen cuyo punto de estimulador correspondiente es el que está más próximo al punto de estimulador de referencia como origen de punto de imagen de referencia reconstruido,
  - establecer un error residual a partir de la diferencia entre el punto de imagen de referencia y el origen de punto de imagen de referencia reconstruido.
4. Método según la reivindicación 2 ó 3, en el que la construcción de la superficie reconstruida comprende un ajuste de superficie usando polinomios de Zernike.
5. Método según la reivindicación 2 ó 3, en el que la construcción de la superficie reconstruida comprende un ajuste de superficie usando funciones *spline*.
6. Método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además la etapa de modificar la superficie reconstruida basándose en el error residual calculado.
7. Topógrafo corneal que comprende
  - una fuente de estimulador (300) dispuesta para iluminar, en uso, una superficie objetivo (320) que comprende una superficie corneal con un patrón de luz,
  - un objetivo de imagen (310) dispuesto para recibir la imagen reflejada de la superficie objetivo, comprendiendo además el topógrafo corneal una unidad computacional dispuesta para;
    - construir una superficie reconstruida (380) que representa la superficie objetivo procesando información de la fuente de estimulador y la imagen recibida sobre el objetivo de imagen,
    - identificar un punto de imagen de referencia sobre el objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia sobre la fuente de estimulador,
    - calcular, para el punto de imagen de referencia, usando la superficie reconstruida, un error residual que representa la correspondencia entre la superficie objetivo y la superficie reconstruida,

**caracterizado porque** la unidad computacional está dispuesta para

  - mostrar el error residual junto con la imagen reflejada de la superficie objetivo que comprende

una superficie corneal.

8. Topógrafo corneal según la reivindicación 7, en el que la unidad computacional está dispuesta para calcular el error residual
- 5
- seleccionando una zona sobre el objetivo de imagen que rodea el punto de imagen de referencia,
  - calculando el punto de origen de estimulador correspondiente para una pluralidad de puntos de imagen en el interior de la zona usando un trazado inverso desde el punto de imagen hacia la superficie reconstruida y desde la superficie reconstruida hacia la fuente de estimulador,
  - seleccionando el punto de imagen cuyo punto de origen de estimulador correspondiente es el que está más próximo al punto de estimulador de referencia como origen de punto de imagen de referencia reconstruido;
  - estableciendo el error residual a partir de la diferencia entre el punto de imagen de referencia y el origen de punto de imagen de referencia reconstruido.
- 10
9. Topógrafo corneal según la reivindicación 7 u 8, en el que la fuente de estimulador está dispuesta para iluminar la superficie objetivo con un patrón de tablero de ajedrez.
- 20
10. Topógrafo corneal según la reivindicación 7 u 8, en el que la fuente de estimulador está dispuesta para iluminar la superficie objetivo con un patrón codificado con colores.
- 25
11. Topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, en el que la unidad computacional está dispuesta además para realizar la etapa de modificar la superficie reconstruida basándose en el error residual calculado.
- 30
12. Topógrafo corneal según la reivindicación 11, en el que la etapa de modificación incluye un ajuste de mínimos cuadrados basándose en el error residual calculado.
- 35
13. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, estando el método precedido por un método de calibración que comprende las etapas de
- identificar un punto de imagen de referencia sobre una imagen generada reflejando un patrón de fuente de estimulador sobre una superficie de referencia hacia un objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia,
  - calcular las coordenadas del punto de estimulador de referencia del punto de imagen de referencia mediante un trazado inverso desde el punto de imagen hacia la superficie de referencia y desde la superficie de referencia hacia la fuente de estimulador,
  - establecer la relación geométrica entre el punto de imagen de referencia y el punto de estimulador de referencia.
- 40
- 45
14. Topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12, en el que la unidad computacional está dispuesta además para realizar, en uso, un método de calibración que comprende las etapas de
- identificar un punto de imagen de referencia sobre una imagen generada reflejando un patrón de fuente de estimulador sobre una superficie de referencia hacia un objetivo de imagen correspondiente a un punto de estimulador de referencia,
  - calcular las coordenadas del punto de estimulador de referencia del punto de imagen de referencia mediante un trazado inverso desde el punto de imagen hacia la superficie de referencia y desde la superficie de referencia hacia la fuente de estimulador,
  - establecer la relación geométrica entre el punto de imagen de referencia y el punto de estimulador de referencia.
- 50
- 55

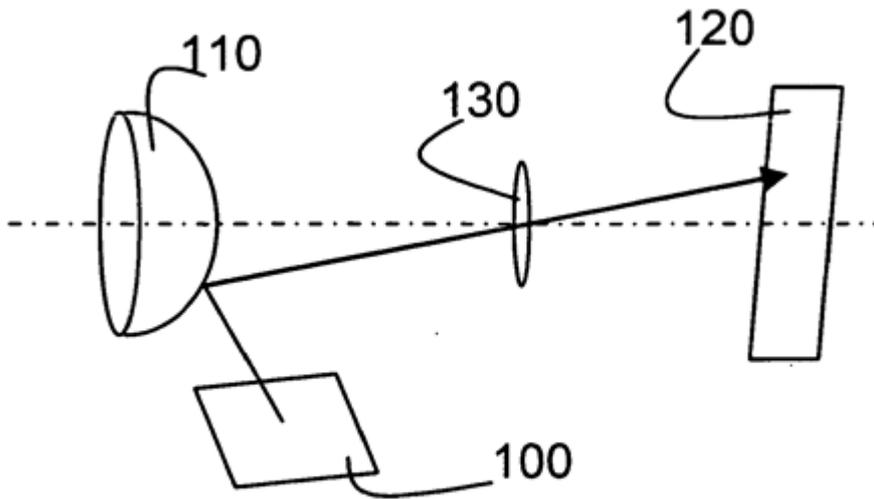


Figura 1

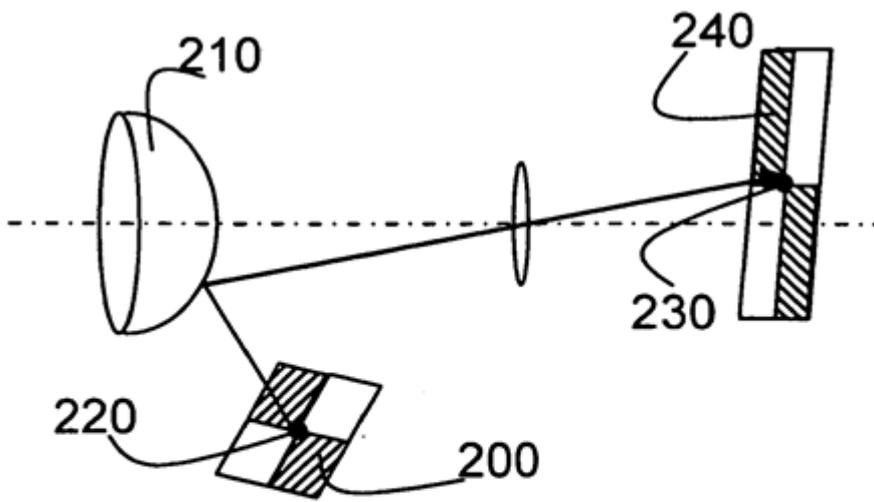


Figura 2

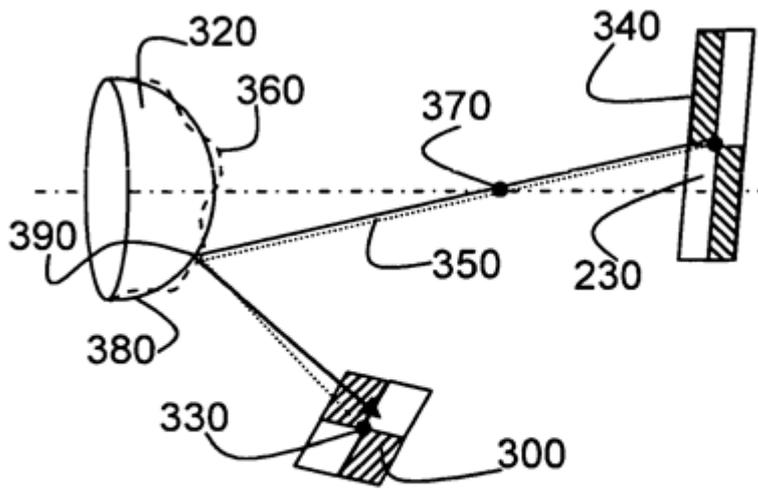


Figura 3

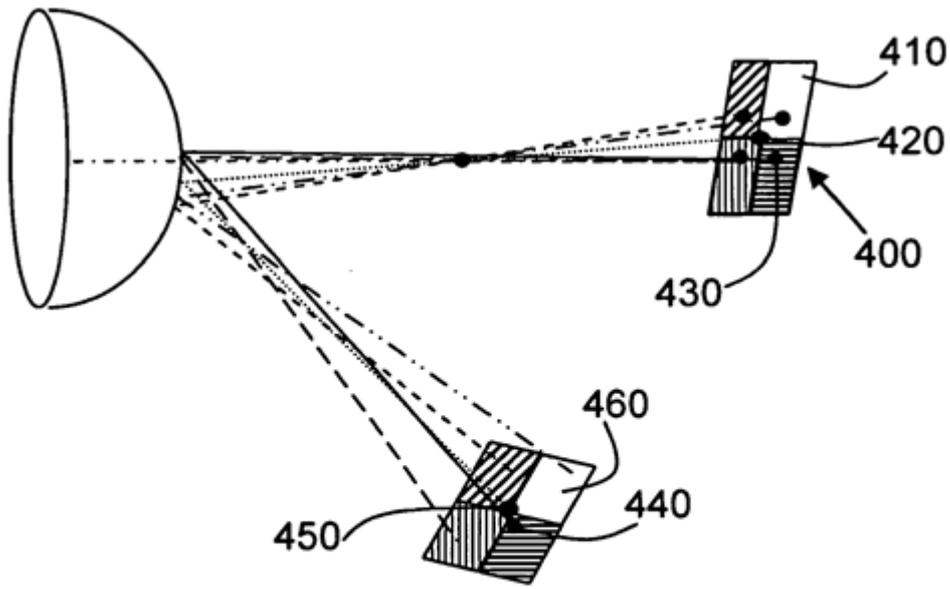


Figura 4