

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 704 663**

51 Int. Cl.:

A61B 3/107 (2006.01)

A61B 3/14 (2006.01)

G06T 7/00 (2007.01)

G01B 11/25 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.11.2011 PCT/NL2011/050785**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.05.2012 WO12067508**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.11.2011 E 11788606 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.10.2018 EP 2640258**

54 Título: **Topógrafo codificado por colores y procedimiento de determinación de un modelo matemático de una superficie corneal**

30 Prioridad:

18.11.2010 NL 2005710
18.11.2010 US 415198 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.03.2019

73 Titular/es:

CASSINI B.V. (100.0%)
Mauritskade 35
2514 HD 's-Gravenhage, NL

72 Inventor/es:

MENSINK, MICHIEL, HERMAN

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 704 663 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

Topógrafo codificado por colores y procedimiento de determinación de un modelo matemático de una superficie corneal

5

Campo técnico

[0001] La presente invención se refiere a un topógrafo corneal, en particular a un topógrafo que comprende una pluralidad de fuentes de luz de diferentes colores.

10

Antecedentes de la invención:

[0002] Los topógrafos corneales son conocidos en general y se usan para determinar el contorno de la superficie anterior de la córnea de un ojo humano, facilitando así el diagnóstico y la evaluación de, por ejemplo, anomalías corneales, diseño y ajuste de lentes de contacto y la realización de procedimientos quirúrgicos.

15

[0003] Dado que la superficie anterior de la córnea contribuye a 2/3 del poder refractivo del ojo, tiene una gran influencia en la formación de imágenes del ojo. La calidad de la formación de la imagen depende de las propiedades de forma de esta superficie. Como tal, un requisito importante en aplicaciones clínicas es la evaluación precisa de esta superficie.

20

[0004] El procedimiento más común en la práctica clínica para determinar la forma de la córnea es a través de una técnica de reflexión especular conocida como topografía corneal basada en Plácido. En este procedimiento, la reflexión de una serie de anillos concéntricos se usa para determinar la forma de la superficie corneal. Debido a que el patrón usado es un patrón continuo de anillos, el análisis del trazado de los rayos para recuperar la forma de la córnea es limitado a los rayos meridianos. Como tal, el análisis no tiene en cuenta los rayos no meridionales que pueden ocurrir si la forma de la córnea no es rotacionalmente simétrica. Como resultado, los errores en la superficie reconstruida pueden ocurrir igualmente.

25

[0005] Para abordar esto, el uso de la topografía corneal con fuente de múltiples puntos se ha propuesto en la literatura. Como ejemplo de tal procedimiento, se puede hacer referencia al documento US 4998819 de Labinger y col. 1991. En este documento, se describe una matriz de fuentes puntuales en la topografía corneal, por lo que la matriz de fuentes se describe por tener las siguientes propiedades:

30

- 35 1) se dispone en una montura hemisférica;
- 2) el patrón LED está dispuesto en un semimeridiano. Resultando en un mayor espacio entre los puntos LED que van a la periferia;
- 3) los LED se pueden diseñar con colores con agrupaciones sugeridas de cambios alternativos de colores.

35

[0006] El documento US 4998819 describe además un algoritmo para obtener, a partir de las reflexiones medidas, por ejemplo, en un sistema de cámara, un modelo que describe la superficie corneal.

40

[0007] Se afirma que la tecnología descrita puede sufrir los siguientes inconvenientes. Con el fin de proporcionar un modelo preciso de la forma de la córnea, es importante establecer la correspondencia uno a uno entre las fuentes puntuales aplicadas y los puntos de imagen, por ejemplo, capturados por una cámara o sistema de lentes-cámara.

45

[0008] Para establecer tal correspondencia uno a uno, se sugiere en el documento US 4998819 pulsar de forma secuencial las fuentes de luz individuales. En caso de un gran número de fuentes de luz, esto puede tardar un tiempo comparativamente grande, durante el cual el objeto que se examina (es decir, la córnea de un ojo) debe permanecer estacionario.

50

[0009] Además, aunque este diseño proporciona el entorno para tener en cuenta la reflexión de rayos no meridionales, se puede observar que el algoritmo descrito todavía está limitado al trazado de los rayos no meridionales. En el trazado de los rayos meridionales, los rayos están obligados a estar en un plano meridiano. Por lo tanto, el algoritmo no incluye la reflexión de rayos no meridionales.

55

[0010] Un dispositivo según el preámbulo de la reivindicación 1 es conocido del documento EP 1 785 690 A1. Como tal, un objeto de la presente invención es proporcionar un topógrafo corneal que permita establecer más

fácilmente la correspondencia uno a uno entre las fuentes puntuales aplicadas y los puntos de imagen.

[0011] Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar un algoritmo alternativo para determinar un modelo de superficie corneal.

5

Resumen de la invención:

[0012] Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un topógrafo corneal que se define en la reivindicación 1.

10

[0013] Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un topógrafo corneal que comprende un estimulador multicolor. En el significado de la presente invención, el estimulador multicolor se usa para denotar una fuente de luz (no limitada a la luz visible) que comprende una pluralidad de fuentes distintas de diferentes colores de puntos o similares a puntos (en general, fuentes que emiten una longitud de onda o un espectro de longitud de onda diferente). Dicho estimulador de fuentes puntuales o similares a puntos puede por ejemplo construirse usando una pluralidad de LED (por ejemplo, que consiste en diferentes grupos que tienen colores diferentes) o una pluralidad de fibras ópticas.

15

[0014] La pluralidad de fuentes de luz del estimulador proporciona un patrón de puntos de origen, desde el cual, en uso, se proporcionan rayos de luz a un objeto de interés, por ejemplo, una superficie corneal. En caso de que se usen LED, los puntos de origen coincidirán así con las posiciones de los LED.

20

[0015] En una realización preferida, los puntos de origen se proporcionan en una pluralidad de placas, tales como placas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés). Como ejemplo que se describe con más detalle a continuación, se usan 7 PCB, cada una provista de un patrón multicolor sustancialmente idéntico, por ejemplo, provista de tres grupos de LED rojos, verdes y azules, respectivamente.

25

[0016] Según la invención, la pluralidad de rayos de luz emitidos desde los puntos de origen está en uso reflejados por el objeto de interés y son recibidos por un sistema de lente-cámara del topógrafo, formando así un patrón de puntos de imagen.

30

[0017] Para cada uno de los puntos de imagen, se dispone una unidad de cálculo del topógrafo para determinar el punto de origen correspondiente en el estimulador. Esto se realiza, según la presente invención, usando información del patrón de color que se basa en el patrón multicolor de los puntos de origen del estimulador y que es, por ejemplo, almacenada en una unidad de memoria de la unidad de cálculo. Dicha información del patrón de color puede, por ejemplo, describir, en forma de variedad o matriz, el patrón multicolor o sus diferentes partes. Como ejemplo, la información del patrón de color puede comprender una pluralidad de matrices de 2x2 o 3x3 que indican los colores o diferentes conjuntos de puntos de origen 2x2 o 3x3.

35

[0018] Basándose en el patrón de puntos de imagen y la información del patrón de color, la unidad de cálculo del topógrafo según la invención puede establecer posteriormente una correspondencia uno a uno entre un punto de origen y un punto de imagen. La información del patrón de color disponible para la unidad de cálculo puede aplicarse por ejemplo para reconocer patrones similares (por ejemplo, conjuntos correspondientes de patrones de color de 2x2 o 3x3 tanto en los puntos de origen como en los puntos de imagen) permitiendo establecer una correspondencia uno a uno.

40

45

[0019] En una realización, la información del patrón de color comprende un identificador para cada uno de los puntos de origen. Tal identificador puede por ejemplo caracterizar los puntos de origen por su color y uno o más colores de los puntos vecinos. Los inventores han establecido que tal caracterización de los puntos de origen permite en gran medida que se establezca la correspondencia uno a uno, cuando se aplican por ejemplo 3 colores diferentes de puntos de origen.

50

[0020] Como tal, el identificador (que puede, por ejemplo, adoptar la forma de una variedad que indica el color del punto de origen y los colores de los puntos vecinos) puede ser único para cada punto de origen.

55

[0021] Con respecto a la técnica anterior descrita anteriormente, el documento US 4998819, vale la pena señalar que aunque se describe el uso de una fuente de luz multicolor, esta característica no se usa en la evaluación de la correspondencia entre los puntos de origen y los puntos de imagen.

[0022] Además, la información del identificador o patrón de color también puede incluir información con respecto a la posición relativa del punto de origen en el patrón del punto de origen. Combinados, la información sobre la posición relativa y el color (es decir, el color del punto de origen y/o los puntos vecinos) puede proporcionar una caracterización única de los puntos de origen y, por lo tanto, permitir establecer la correspondencia uno a uno.

5

[0023] En una realización preferida, el área de la imagen se puede organizar para subdividirse en varias secciones; esto puede realizarse por ejemplo organizando los puntos de origen en una pluralidad de segmentos del estimulador multicolor, por ejemplo, en las placas PCT, cada segmento se proporciona de este modo en una parte del área de la imagen. En tal disposición, se puede hacer un uso más efectivo de usar solo un número limitado de colores diferentes. En tal disposición, las secciones del área de la imagen pueden ser idénticas o no. En una realización, los segmentos pueden tener por ejemplo un patrón multicolor idéntico, aparte de un patrón único a lo largo de uno o más bordes de la sección. La combinación de una evaluación del patrón de color en el uno o más bordes con una evaluación de la información de un patrón de color como se mencionó anteriormente, permite de nuevo establecer la correspondencia uno a uno entre los puntos de origen y los puntos de imagen.

10

15

[0024] En tal disposición, la identificación del punto de la imagen se basa, por lo tanto, en un identificador o información de patrón de color combinada con un identificador adicional que permite una identificación del segmento del estimulador (por ejemplo, basado en un patrón de color en un borde).

20

[0025] En general, según una realización preferida de la invención, se hace uso de un identificador que se basa en información del patrón de color en combinación con un identificador adicional para permitir una caracterización única de un punto de imagen, por ende, se establecerá la correspondencia uno a uno. Dicho identificador adicional, que permite por ejemplo una identificación de un segmento del estimulador, no necesita basarse en un patrón de color de los puntos de imagen (por ejemplo, los colores de los puntos de imagen en un borde), pero puede, como ejemplo, también basarse en el patrón observado de puntos de imagen, es decir, la forma en que los puntos de imagen se disponen entre sí.

25

[0026] Mediante el uso combinado de un identificador basado en un patrón de color y un identificador adicional, se puede hacer un uso más efectivo a partir de un número limitado de colores diferentes. Sin esto, 3 colores, por ejemplo, no son suficientes para hacer un código de color único por ejemplo para 700 puntos. El uso de diferentes secciones en el estimulador (cada una de las cuales puede, por ejemplo, estar caracterizada/identificada por un identificador adicional (que no tiene que estar relacionado con el color)) permite identificar de manera única más puntos de imagen usando solo un número limitado de colores. Usando la correspondencia uno a uno, la unidad de cálculo puede construir posteriormente, basándose en las posiciones de los puntos de imagen y las posiciones de los puntos de origen correspondientes, el modelo matemático de la superficie.

30

35

[0027] Dicha construcción se puede obtener usando algoritmos bien conocidos de ajuste de curva para la reconstrucción de superficies. Como alternativa, se puede aplicar un procedimiento de reconstrucción de superficie según la invención.

40

[0028] Según un segundo aspecto de la invención, se proporciona un procedimiento de determinación de una reconstrucción matemática de una superficie corneal, como se define en la reivindicación 14.

[0029] Como se explicará con más detalle a continuación, en la presente invención, la correspondencia uno a uno entre los puntos de imagen y de origen se puede establecer, en gran medida, mediante el uso de codificación de colores del patrón de fuente de múltiples puntos usando, por ejemplo, tres o más colores de puntos de origen. Además, se presenta una configuración de montaje sistemático para un estimulador multicolor y un nuevo algoritmo para la reconstrucción precisa de la superficie.

45

[0030] Estos y otros aspectos de la invención se apreciarán más fácilmente a medida que se comprenda mejor por referencia a la siguiente descripción detallada y se considere en relación con los dibujos adjuntos en los que los símbolos de referencia similares designan partes similares.

50

Breve descripción de los dibujos

55

[0031]

La Figura 1 representa esquemáticamente una realización de un topógrafo según la presente invención.

La Figura 2 muestra esquemáticamente un panel que comprende un patrón de punto de origen multicolor que puede

aplicarse en un topógrafo según la invención.

La Figura 3 muestra esquemáticamente un patrón de puntos de imagen como se obtiene usando un estimulador que comprende 7 paneles como se muestra en la Figura 2.

La Figura 4 muestra esquemáticamente parte de un patrón de puntos de imagen que puede obtenerse usando un topógrafo según la invención.

Descripción

[0032] En la Figura 1, se muestra esquemáticamente una realización del topógrafo corneal según la presente invención. La realización muestra esquemáticamente un estimulador multicolor 100 dispuesto para proyectar una pluralidad de rayos de luz sobre una superficie corneal 110. El estimulador 100 puede tener por ejemplo una superficie con forma cónica o con forma hemisférica 120, por lo que una pluralidad de los puntos de origen está dispuesta en esta superficie 120 para proyectar la pluralidad de rayos de luz sobre la superficie corneal 110. En una realización, los puntos de origen pueden proporcionarse montando los LED 130 de diferente color en la superficie 120. Como alternativa, los puntos de origen pueden consistir en puntos finales de fibra óptica dispuestos para emitir rayos de luz hacia la superficie de la córnea 110. Como se muestra esquemáticamente, un rayo incidente de luz I , emitido por el punto de origen (P_o) 130.1 (que tiene coordenadas (X_s, Y_s, Z_s)) intersecta la superficie corneal 110 (en el punto de intersección corneal C (que tiene coordenadas (X_c, Y_c, Z_c)) y da como resultado un rayo de luz reflejado R hacia una lente 150 de un sistema de lente-cámara para registrar la reflexión corneal. El rayo de luz reflejado R es recibido posteriormente por un plano de cámara 170 del sistema de lente-cámara que da como resultado un punto de imagen (P_i) que tiene coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) . Como se puede apreciar en la Figura 1, la apertura del cono 120 (o hemisferio) se orienta hacia la superficie corneal 110 del ojo que se va a medir. El topógrafo como se muestra comprende además una unidad de cálculo 180, por ejemplo, un ordenador, o microprocesador para procesar las imágenes capturadas y construir, en base a la imagen capturada, una representación matemática de la superficie corneal 110.

[0033] En una realización, el estimulador multicolor comprende una pluralidad de segmentos, que pueden ser idénticos o no. Como ejemplo de tal realización, los puntos de origen del estimulador están montados en una pluralidad de placas, tales como PCB. En tal disposición, se pueden ensamblar múltiples paneles de PCB para formar una forma sustancialmente cónica. Como ejemplo, un estimulador de este tipo puede construirse usando al menos 3 paneles. A continuación, se muestra un ejemplo más detallado que comprende 7 paneles de PCB. La Figura 2 muestra esquemáticamente una vista en planta de dicho panel 200 mediante el cual los símbolos o , $+$ y \bullet se usan para denotar posiciones de puntos de origen de diferentes colores. En el ejemplo mostrado, 96 puntos de origen (por ejemplo, LED) están dispuestos en el panel. Se pueden ensamblar 7 de dichos paneles, por lo que cada panel de PCB puede tener una disposición idéntica de puntos de origen, es decir, LED de colores, para formar el estimulador sustancialmente cónico. En una realización, la disposición del punto de origen en un panel es tal que una reflexión sobre una superficie esférica formará un patrón cuadrículado sustancialmente rectangular. En la figura 3, se muestra esquemáticamente el patrón de imagen resultante 300 cuando se usan 7 paneles según la Figura 2. Como lo indican las líneas de puntos 310, los puntos de imagen obtenidos forman un patrón cuadrículado sustancialmente rectangular. Para identificar un panel particular de los otros paneles (suponiendo que los paneles sean idénticos), se puede usar la orientación del patrón cuadrículado rectangular. Por lo tanto, una orientación de este tipo puede usarse para ayudar a establecer una identificación única de un punto de imagen. La orientación del patrón cuadrículado puede derivarse por ejemplo de la evaluación de las posiciones de un subconjunto de puntos de imagen. Como puede observarse en el patrón de puntos de origen en la Figura 2, para realizar un patrón cuadrículado rectangular como un patrón de puntos de imagen, los puntos de origen pueden disponerse a lo largo de líneas curvas, por ejemplo, curvatura 210 como se indica en la Figura 2.

[0034] Para establecer una correspondencia uno a uno entre los puntos de origen y los puntos de imagen, el topógrafo corneal según la invención aplica información del patrón de color basada en el patrón multicolor de los puntos de origen. Dicha información puede por ejemplo describir partes del patrón de color, por ejemplo, como una pluralidad de variedades de matrices. Como ejemplo, se pueden usar $n \times m$ matrices (por ejemplo, 2×2 o 3×3) para describir el patrón de color de $n \times m$ puntos de origen. Al hacer coincidir los patrones de color de las matrices con el patrón de los puntos de imagen, se puede establecer una correspondencia entre los puntos de imagen y el punto de origen. Además, se puede observar que dicha comparación de patrones se facilita cuando, como se ilustra en la Figura 3, los puntos de origen del estimulador están dispuestos de tal manera que se obtiene un patrón cuadrículado rectangular en el plano de la cámara. Para realizar esto, se puede usar una forma nominal predeterminada del objeto de interés para determinar cómo colocar los puntos de origen en el estimulador para obtener el patrón cuadrículado sustancialmente rectangular.

[0035] Como una alternativa a la caracterización del patrón multicolor de los puntos de origen por información del patrón de color que comprende $n \times m$ matrices, los puntos de origen pueden caracterizarse por un identificador. Tal identificador puede comprender por ejemplo un código de color basado en el color del punto de origen o puntos de origen vecinos.

5

[0036] En una realización, para facilitar el establecimiento de la correspondencia uno a uno entre los puntos de origen y los puntos de imagen, se emplea un esquema de codificación de color con la siguiente propiedad: a cada punto de origen se le asigna un color de manera tal que cada punto de origen se puede caracterizar por un patrón único de cinco colores, que consiste en su propio color y el color de sus vecinos de izquierda, derecha, arriba y

10 abajo. Para los puntos de origen en el borde del panel, la ausencia de vecinos en una dirección puede considerarse o indexarse como otro color único. Para facilitar la identificación de los paneles, los colores de los puntos de origen se pueden asignar de tal manera que también se cumplan las siguientes propiedades adicionales:

- 1) un patrón de borde es una combinación única de 2 colores, por ejemplo, ROJO Y VERDE y otro borde es otro
- 15 patrón de borde que es una combinación única de 2 colores, por ejemplo, ROJO y AMARILLO
- 2) el anillo interior de la reflexión del panel combinado como se recibe en el plano de la cámara está dispuesto para producir un color, por ejemplo, VERDE.

[0037] Cuando solo hay un número limitado de colores disponibles, es posible que el número de patrones de color posibles no sea lo suficientemente grande como para asignar un patrón único a cada punto de origen. Para permitir más LED que patrones únicos, la propiedad de asignación de LED puede relajarse, de modo que a cada LED se le asigna un patrón de cinco colores (es decir, un identificador) que solo es LOCALMENTE único. En este caso, los LED aún se pueden identificar si los patrones duplicados están separados físicamente por un espacio suficiente para que no haya confusión en cuanto a qué instancia del patrón se está reconociendo. Expresado de

25 manera diferente, además del código de color del punto de origen, se usa una posición relativa o información posicional para determinar la correspondencia uno a uno entre el punto de origen y el punto de imagen. Si se satisfacen las propiedades de reconocimiento del panel descritas anteriormente, esto significa que los patrones duplicados han de estar separados al menos por la cantidad máxima de desplazamiento de cada reflexión, que es una propiedad de la aberración máxima que se debe medir.

30

[0038] Como alternativa o además de usar información de posición, el identificador de los puntos de origen se puede detallar aún más. Esto se ilustra en la Figura 4, que muestra una parte de un patrón de puntos de imagen que puede recibir el sistema de cámara del topógrafo según la invención. En la Figura 4, un punto de imagen 400 que tiene un color indicado por "o" está rodeado por puntos de imagen que tienen los colores "o", "x" o "•". Como

35 identificador para el punto de origen correspondiente, se puede usar una matriz $[o \bullet x o \bullet]$ que describe los colores del punto de origen (primera posición en la matriz) y los colores de los puntos de origen arriba, a la derecha, abajo y a la izquierda del punto vecino en respectivamente la segunda, tercera, cuarta y quinta posición de la matriz. Si dicha caracterización es insuficiente para obtener un identificador único, también se pueden usar los colores del vecino superior izquierdo, superior derecho, inferior derecho e inferior izquierdo, por ejemplo, dando como resultado

40 un identificador $[o \bullet \bullet x x o o \bullet \bullet]$ que describe los colores del punto de origen (primera posición en la matriz) y los colores de los 8 vecinos del punto de origen en el sentido de las agujas del reloj comenzando con el vecino superior. Como entenderá el experto en la materia, se pueden elegir selecciones alternativas del número de puntos vecinos, dependiendo por ejemplo de la cantidad de colores disponibles, de manera que se pueda obtener un identificador único.

45

[0039] Según la invención, el topógrafo corneal comprende una unidad de cálculo que comprende, por ejemplo, en una unidad de memoria, la información del patrón de color (que puede, por ejemplo, adoptar la forma de una tabla de identificadores como se describe anteriormente o una pluralidad de matrices que describen partes del patrón de puntos de origen); la unidad de cálculo está dispuesta para establecer la correspondencia uno a uno entre

50 los puntos de imagen (según lo capturado por el sistema de lente-cámara) y los puntos de origen. Esto puede realizarse por ejemplo por

- determinar un identificador del punto de imagen basado en el patrón de puntos de imagen capturados y;
- determinar el punto de origen correspondiente con el mismo identificador.

55

[0040] Una vez que se establece esta correspondencia uno a uno, la unidad de cálculo puede determinar un modelo o una representación matemática de la superficie corneal basándose en las posiciones de los puntos de imagen (por ejemplo, se puede obtener a partir de la imagen capturada en el plano de la cámara 170 como se muestra en la Figura 1) y las posiciones de los puntos de origen correspondientes, que pueden conocerse antes de

que se determinen mediante la calibración del topógrafo.

[0041] Como reconocerá un experto en la materia, la complejidad requerida de un identificador único puede depender del patrón de color que se haya asignado al patrón del punto de origen. Inversamente, a partir de un tipo particular de identificador (por ejemplo, que describe los colores del punto de origen y los colores del punto vecino arriba, derecha, abajo e izquierda del punto de origen), los puntos de origen deben disponerse de tal manera que permitan sustancialmente que se encuentre la correspondencia uno a uno. Con el fin de determinar qué colores asignar a la pluralidad de puntos de origen (por ejemplo, LED), se puede usar el siguiente procedimiento (que puede ser automatizado):

10

Etapa 1: asignar colores aleatoriamente a cada punto de origen, teniendo en cuenta las restricciones relacionadas con el reconocimiento del panel.

Etapa 2: puntuar la asignación de color realizada a los puntos de origen. La puntuación se basa principalmente en el número de patrones únicos, pero también puede incluir propiedades deseables adicionales, como colores preferenciales (por ejemplo, preferir colores para los cuales se encuentran disponibles LED más baratos con menores requisitos de potencia) o patrones que son más fáciles de enrutar en una PCB (por ejemplo, con menos cruces de líneas eléctricas a diferentes LED).

15

Etapa 3: si la puntuación es suficiente, finalizar el algoritmo, de lo contrario, repetir las etapas 1 y 2. Se ha descubierto que, si el número de asignaciones posibles es suficientemente grande (es decir, hay relativamente muchos colores disponibles para el número requerido de puntos de origen), este algoritmo termina rápidamente en un ordenador simple.

20

[0042] Cuando se usa un estimulador multicolor segmentado, por lo que cada segmento se puede identificar (por ejemplo, en función de la orientación de los puntos de imagen, o un esquema de color usado en un borde del segmento), se puede hacer un uso más eficiente de diferentes colores.

25

[0043] La siguiente tabla ilustra el número de permutaciones únicas para un número dado de colores (n), para puntos internos y puntos de borde.

30

Tabla 1:

N.º de colores	N.º de permutaciones únicas para puntos internos	N.º de permutaciones únicas para puntos de borde (por ejemplo, aplicable cuando el panel tiene un límite de borde recto)
2	$2^5 = 32$	$2^4 = 16$
3	$3^5 = 243$	$3^4 = 81$
...
n	n^5	n^4

[0044] La tabla anterior muestra la relación entre el número de colores usados en un estimulador multicolor para un topógrafo corneal y los identificadores únicos posibles correspondientes, considerando el color de los cuatro vecinos más cercanos y el color del punto en sí. Para dos colores, la cuadrícula puntual $32+16 = 48$ aún puede tener un código único para cada punto. Mediante el uso de una pluralidad de segmentos (por ejemplo, placas de PCB) que puede identificarse por ejemplo según la orientación del patrón de puntos de imagen observado, los diferentes segmentos pueden tener patrones de color idénticos, ya que se puede establecer una identificación única del punto de imagen basándose en una identificación del punto de imagen dentro de un segmento (por ejemplo, usando el identificador basado en el color de los cuatro vecinos más próximos y el color del punto en sí) combinado con una identificación del segmento (por ejemplo, basado en un identificador adicional, como una orientación del patrón de puntos de la imagen). Si se aplican patrones de color idénticos, por ejemplo, en paneles diferentes, por lo que a cada panel se le asigna una ubicación y orientación diferentes, se puede aplicar un aumento adicional en los posibles identificadores mediante un código de color en los bordes, considerando la ausencia de un punto vecino como un identificador adicional. Al considerar la posición del punto vecino ausente, esto permite distinguir entre un borde del panel y el borde opuesto del panel. Como tal, cada panel puede alojar al menos puntos de cuadrícula $32+16+16 = 64$ (cuando se usan al menos dos colores).

35

40

45

[0045] Como tal, según la invención, se puede realizar una correspondencia uno a uno entre los puntos de origen y de imagen para cualquier reflexión corneal usando la información del patrón de color del patrón de punto de origen. Como se mencionó, el uso de la propiedad de cuadrícula rectangular del patrón de puntos de imagen (cuando esté disponible) puede facilitar aún más el establecimiento de la correspondencia uno a uno.

50

[0046] Para construir un modelo matemático de la superficie corneal (es decir, proporcionar datos de

elevación de la superficie anterior de la córnea), se deben seguir las siguientes etapas.

1) Adquirir una imagen

5 **[0047]** La reflexión corneal capturada por la cámara (por ejemplo, en el plano de imagen 170 de la Figura 1) se registra en consecuencia. La configuración de medición se toma a lo largo de la línea de visión del ojo. En la práctica, esto puede implementarse haciendo que el eje óptico del instrumento pase a través del centro de la pupila de entrada del ojo.

10 2) Especificar ubicación puntos de origen y de imagen

[0048] La ubicación x , y , z de los puntos de origen puede determinarse por calibración (por ejemplo, usando una versión modificada del procedimiento de Labinger y col. 1991 como se describe en el documento US 4998819; el procedimiento que aplica el trazado de rayos tiene en cuenta los rayos no meridionales en lugar de usar un trazado de rayos meridionales como lo hizo Labinger). Con respecto a la posición de los puntos de imagen, la ubicación x , y , z del centroide de cada reflexión del punto de origen puede considerarse la posición del punto de la imagen.

3) Correspondencia uno a uno de puntos de origen y de imagen

20

[0049] Asumiendo un identificador de punto de origen que describe los colores del punto de origen y los colores del punto vecino arriba, derecha, abajo e izquierda del punto de origen disponible, se determina lo siguiente para cada reflexión del punto de origen:

25 - el color del punto de imagen,

- el código de color que representa los puntos de la imagen vecinos, es decir, izquierda, derecha, arriba y abajo,

- el panel de PCB al que pertenecen los puntos de origen (siempre que se use una pluralidad de paneles) y, si es necesario

- la ubicación relativa del punto de origen dentro del patrón de puntos de imagen, por ejemplo, un patrón cuadrangular

30 rectangular.

[0050] Usando la información de patrón de color grabada (es decir, los identificadores de punto de origen), se establece una correspondencia uno a uno entre los puntos de origen e imagen.

35 4) Reconstrucción de la superficie dando como resultado por ejemplo un mapa de elevación de la córnea a partir del cual se pueden derivar otros parámetros: parámetros queratométricos, aberraciones de la córnea, mapa de curvatura, mapas de altura residual, etc.).

40 **[0051]** Según la presente invención, se propone el siguiente procedimiento para proporcionar un modelo matemático de la superficie corneal. Sin embargo, debe observarse que también se pueden aplicar procedimientos alternativos conocidos en la técnica.

[0052] Como ya se mencionó anteriormente, la superficie corneal puede producir una reflexión especular distinguible cuando se usan fuentes de luz apropiadas (por ejemplo, LED que producen luz visible, fuentes IR, etc. Dependiendo de la sensibilidad de la cámara, por ejemplo, se puede usar una intensidad luminosa típica de 50 mcd a 20 mA para un LED verde). El modelado de tal fenómeno de reflexión (como se muestra en la Figura 1) puede, en general, comenzar con puntos de origen con coordenadas x_s , y_s , z_s . Estos se trazan hacia los puntos de intersección en la superficie corneal x_c , y_c , z_c y se procede con el rayo reflejado hacia los puntos de imagen x_i , y_i , z_i capturados por una cámara. En general, el rayo reflejado (R en la Figura 1) es una restricción para pasar a través del punto nodal 0,0,0, (véase la Figura 1) del sistema de lentes-cámara ya que solo se considera el rayo principal de la luz emitida.

50 **[0053]** A continuación, se usarán las siguientes definiciones y ecuaciones:

Tabla 2:

Punto de origen de reflexión	(x_s, y_s, z_s)	
Punto de origen de reflexión	(x_i, y_i, z_i)	
Punto de intersección en la córnea	(x_c, y_c, z_c)	
Vector incidente (longitud x cosenos direccionales)	$\ell(l_x, l_y, l_z)$	
Vector reflejado (longitud x cosenos direccionales)	$\ell_R(R_x, R_y, R_z)$	
Vector normal N en la superficie de la córnea	(N_x, N_y, N_z)	
Ecuación de la superficie	$-z_c + f(x_c, y_c) = 0$	(1)
Vector incidente	$(x_c - x_s, y_c - y_s, z_c - z_s) = \ell(l_x, l_y, l_z)$	(2)
Vector reflejado	$(-x_c - y_c - z_c) = \ell_R(R_x, R_y, R_z)$	(3)
Producto escalar	$(I + R) \bullet N = 0$	(4)
Producto vectorial	$(I - R) \times N = 0$	(5)
Gradiente de superficie		(6)

$$\langle N_x, N_y, N_z \rangle = \left\langle \frac{\partial f}{\partial x_c}, \frac{\partial f}{\partial y_c}, -1 \right\rangle$$

5 **[0054]** Dado un conjunto de puntos de origen de estimulador conocidos y puntos de imagen correspondientes, la superficie corneal se puede reconstruir de la siguiente manera:
El vector de reflexión como se describe en la ecuación (3) se puede describir mediante:

$$\langle x_i, y_i, z_i \rangle = \ell_R \langle R_x, R_y, R_z \rangle \tag{7}$$

10 que se deriva trazando desde el punto nodal hasta el punto de la imagen. Todos los parámetros en la ecuación (7) son variables conocidas. Al combinar esto con las otras ecuaciones, se puede determinar una solución iterativa para encontrar los coeficientes de Zernike apropiados que describan la superficie corneal usando el siguiente procedimiento. En contraste con los procedimientos alternativos conocidos en la técnica, este nuevo procedimiento
15 no implica aproximaciones.

[0055] El procedimiento se puede describir de la siguiente manera:

ETAPA 1: Crear ecuaciones matriciales derivadas de las ecuaciones en la Tabla 1 y la Ecuación (7):

20

$$\frac{z_c}{r_p} = M \begin{pmatrix} x_c & y_c \\ r_p & r_p \end{pmatrix} C \tag{8}$$

Representando la ecuación de superficie expresada en la convención de Zernike: p r es el radio de la pupila usado como referencia para un círculo unitario, M es la representación matricial de los polinomios de Zernike y C son los
25 coeficientes de Zernike. Además, se pueden derivar dos ecuaciones matriciales del producto vectorial (Ecuación 5):

$$I_x - R_x = -(I_z - R_z) \frac{\partial M}{\partial x} C \quad (9)$$

$$I_y - R_y = -(I_z - R_z) \frac{\partial M}{\partial y} C \quad (10)$$

ETAPA 2: Usar valores iniciales de cero para los coeficientes de Zernike para representar una superficie plana en el plano del ápex corneal. Usando el trazado de rayos, los puntos de imagen se pueden trazar hasta el plano del ápex y formar los puntos x_c , y_c , z_c .

ETAPA 3: Usar x_c , y_c , z_c como información para calcular un nuevo conjunto de coeficientes de Zernike C explotando las ecuaciones matriciales (8-11). Estas ecuaciones matriciales se pueden convertir en la forma:

$$A(x_c, y_c, z_c) = B(x_c, y_c, z_c) C \quad (11)$$

La solución para la Ecuación (11) está dada por:

$$C = [B^T B]^{-1} [B^T A] \quad (12)$$

Que se puede resolver numéricamente, por ejemplo, utilizando el algoritmo pseudo inverso de Moore-Penrose.

ETAPA 4: Regresar a la ETAPA 2 para construir una nueva superficie con los nuevos coeficientes de Zernike. Continuar con la ETAPA 3 para determinar los coeficientes de Zernike más precisos. Repetir esta iteración hasta que se haya alcanzado la precisión deseada. Los inventores han observado que la convergencia del procedimiento descrito es bastante rápida. En general, con tres iteraciones ya se puede lograr una precisión submicrométrica de la altura de elevación corneal. En el procedimiento descrito, la superficie corneal se modela usando polinomios de Zernike. Como entenderá el experto en la materia, se pueden usar otras convenciones, es decir, polinomios de Taylor, etc. A partir de los datos básicos de elevación que se obtienen mediante el procedimiento descrito, se pueden derivar los parámetros queratométricos (radio axial, local de curvatura, eje de astigmatismo), datos de aberración corneal, mapas de curvatura y mapas de altura residual.

[0056] El algoritmo descrito puede compararse con el algoritmo de la técnica anterior descrito por Sicam y col. 2004 (J. Opt. Soc. A.m. A/Vol. 21, No. 7/July 2004). En el algoritmo de la técnica anterior, se hace una aproximación para relacionar dos puntos corneales relevantes: 1) la proyección del punto corneal desde la intersección del rayo en el plano del ápex corneal y 2) el punto real de intersección del rayo (punto C en la Figura 1) en la córnea. En el nuevo algoritmo, el primero ya no es necesario para una reconstrucción completa de la superficie.

[0057] Según se requiera, las realizaciones detalladas de la presente invención se describen en esta solicitud; sin embargo, debe entenderse que las realizaciones descritas son meramente ejemplos de la invención, que pueden realizarse en diversas formas. Por lo tanto, los detalles estructurales y funcionales específicos descritos en esta solicitud no deben interpretarse como limitantes, sino simplemente como una base para las reivindicaciones y como una base representativa para enseñar a un experto en la técnica a emplear de varias formas la presente invención en prácticamente cualquier estructura apropiadamente detallada. Además, los términos y frases usados en esta solicitud no tienen por objeto ser limitativos, sino más bien proporcionar una descripción comprensible de la invención.

[0058] Los términos "un", "uno" o "una", como se usan en esta solicitud, se definen como uno o más de uno. El término pluralidad, como se usa en esta invención, se define como dos o más de dos. El término otro, como se

usa en esta solicitud, se define como al menos un segundo o más. Los términos que incluye y/o que tiene, como se usan en esta solicitud, se definen como que comprende (es decir, lenguaje abierto, sin excluir otros elementos o etapas). Cualquier signo de referencia en las reivindicaciones no debe interpretarse como limitante del alcance de las reivindicaciones o la invención.

5

[0059] El mero hecho de que ciertas medidas se reciten en reivindicaciones dependientes mutuamente diferentes no indica que una combinación de estas medidas no se pueda usar para obtener ventajas.

[0060] Un solo procesador u otra unidad puede cumplir las funciones de varios artículos enumerados en las
10 reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un topógrafo corneal que comprende:
- 5 un estimulador multicolor (100) que comprende una pluralidad de fuentes luminosas (130) dispuesto para formar un patrón multicolor de puntos de origen (130) para proyectar una pluralidad de rayos luminosos sobre una superficie de un objeto de interés, tal como una córnea (110);
un sistema de lente-cámara (170) dispuesto para recibir una pluralidad respectiva de rayos luminosos reflejados en la superficie del objeto de interés, formando así un patrón de puntos de imagen;
- 10 una unidad de cálculo (180) para determinar un modelo matemático de la superficie; en el que la unidad de cálculo que comprende una unidad de memoria provista de informaciones de patrón de color basadas en el patrón multicolor de los puntos de origen (130) del estimulador; las informaciones del patrón de color comprenden un identificador único para cada uno de los puntos de origen,
la unidad de cálculo (180) está dispuesta para establecer, para cada uno de la pluralidad de rayos luminosos reflejados, una correspondencia uno a uno entre un punto de origen y un punto de imagen basado en las
- 15 informaciones del patrón de color;
la unidad de cálculo (180) está además dispuesta para construir, basándose en las posiciones de los puntos de la imagen y las posiciones de los puntos de origen correspondientes, el modelo matemático de la superficie, **caracterizado porque** el identificador único es un identificador único basado en al menos un color de puntos de
- 20 origen vecinos del punto de origen.
2. El topógrafo corneal según la reivindicación 1, en el que las informaciones de patrón de color comprenden las informaciones de color y de posición relativa de los puntos de origen (130).
- 25 3. El topógrafo corneal según la reivindicación 1, en el que establecer la correspondencia uno a uno comprende:
- determinar un identificador del punto de imagen basándose en el patrón de puntos de imagen y;
 - determinar el punto de origen correspondiente con el mismo identificador.
- 30 4. El topógrafo corneal según la reivindicación 2, en el que establecer la correspondencia uno a uno comprende:
- caracterizar cada punto de imagen basándose en el patrón de puntos de imagen por su color y un color de los
 - 35 puntos de imagen vecinos y;
 - determinar el punto de origen correspondiente en función de las informaciones de color y de posición relativa de los puntos de origen.
5. El topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el identificador
- 40 único se basa en un color del punto de origen y/o en el que el identificador único se base en una posición relativa del punto de origen en el patrón.
6. El topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, por el que se proporciona el patrón multicolor de puntos de origen en una pluralidad de segmentos (200).
- 45 7. El topógrafo corneal según la reivindicación 6, en el que se aplica un identificador adicional para identificar un segmento de la pluralidad de segmentos y en el que el establecimiento de la correspondencia uno a uno entre un punto de origen y un punto de imagen se basa además en el identificador adicional.
- 50 8. El topógrafo corneal según la reivindicación 7, en el que el identificador adicional comprende un color o un patrón de colores aplicado en un borde del segmento.
9. El topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la pluralidad de
- 55 segmentos comprende una pluralidad de placas sustancialmente idénticas, tales como placas de circuito impreso (PCB).
10. El topógrafo corneal según la reivindicación 9, por el que se dispone el patrón multicolor de los puntos de origen en las placas para generar, en uso, un patrón cuadrícula sustancialmente rectangular de puntos de imagen para cada placa.

11. El topógrafo corneal según la reivindicación 10, en el que se usa una orientación del patrón cuadrangular como un identificador adicional para establecer la correspondencia uno a uno entre un punto de origen y un punto de imagen.
- 5 12. El topógrafo corneal según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, por lo que el patrón multicolor comprende al menos tres colores diferentes.
13. Un procedimiento de determinación de un modelo matemático de una superficie corneal, comprendiendo el procedimiento:
- 10
- proyectar una pluralidad de rayos luminosos a partir de un patrón multicolor de puntos de origen a una superficie de un objeto de interés;
 - recibir una pluralidad respectiva de rayos luminosos reflejados en la superficie del objeto de interés, formando así un patrón de puntos de imagen;
- 15
- proporcionar informaciones de patrón de colores basadas en el patrón multicolor de los puntos de origen del estimulador, donde las informaciones del patrón de colores comprenden un identificador único para cada uno de los puntos de origen, en el que el identificador único es un identificador único basado en al menos un color de puntos de origen vecinos del punto de origen;
 - establecer una correspondencia uno a uno entre los puntos de origen y los puntos de imagen en base a las
- 20
- informaciones del patrón de colores;
 - determinar una reconstrucción matemática de la superficie corneal basada en una posición de los puntos de imagen y una posición de los puntos de origen correspondientes.
14. El procedimiento según la reivindicación 13, en el que la correspondencia uno a uno entre los puntos
- 25 de origen y los puntos de imagen se basa en una orientación de los puntos de imagen.

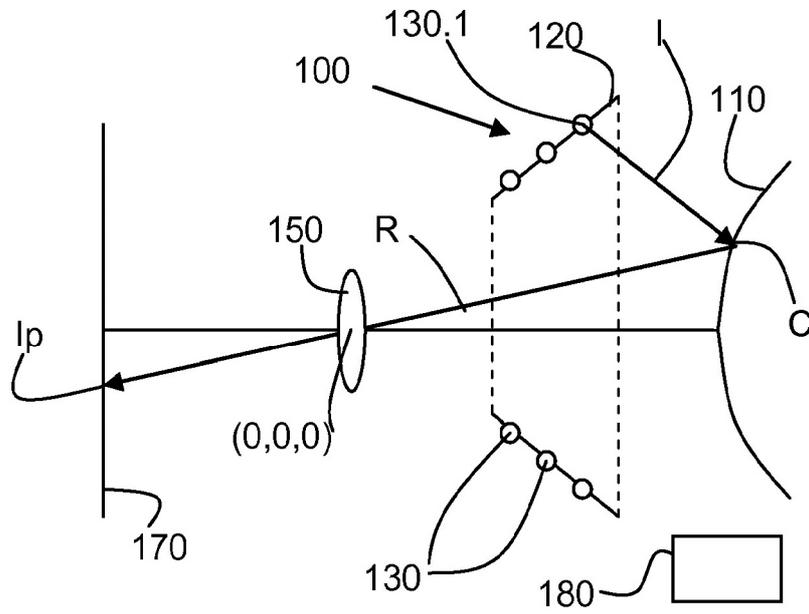


Figura 1

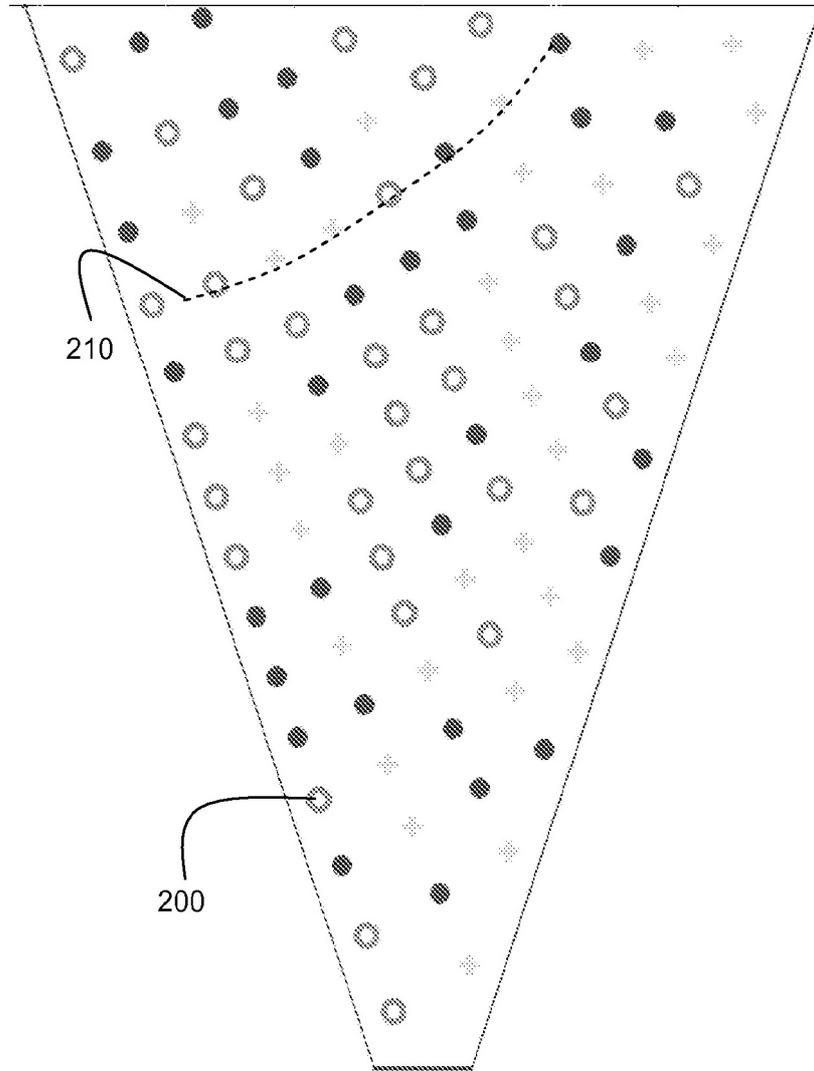


Figura 2

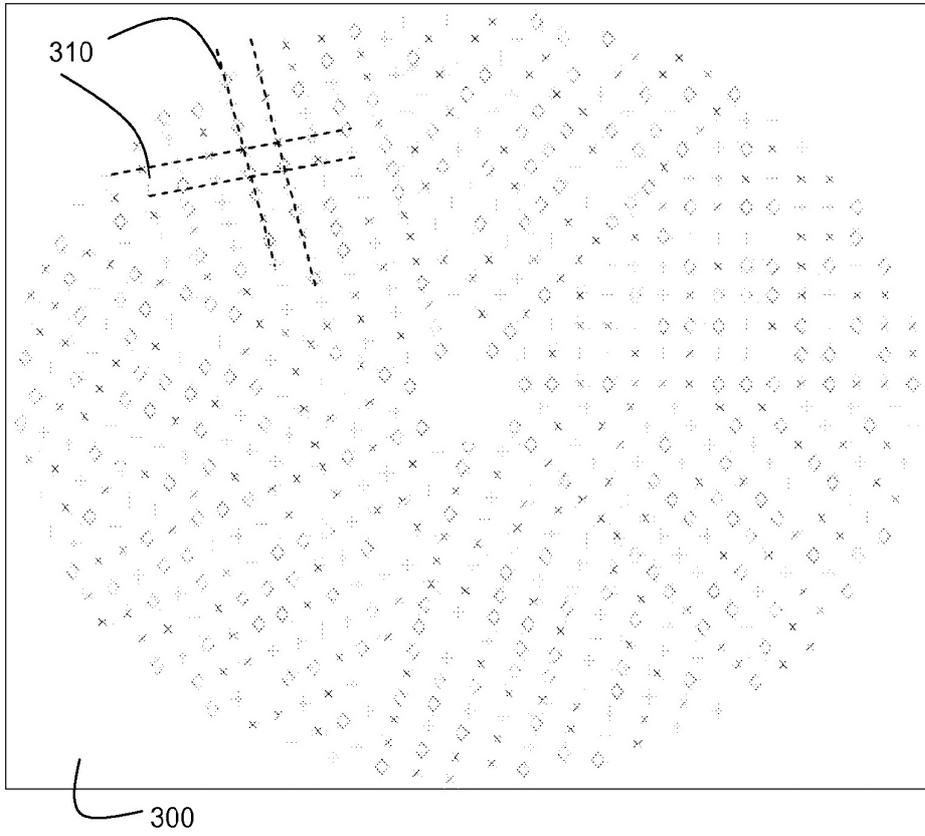


Figura 3

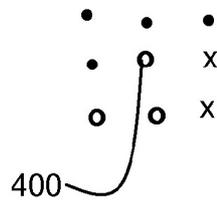


Figura 4