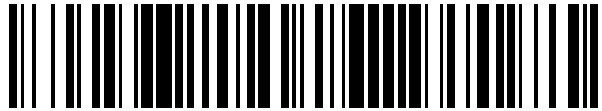


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 087**

21 Número de solicitud: 201631094

51 Int. Cl.:

A61B 3/11 (2006.01)

G02C 7/08 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

12.08.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

13.03.2018

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

22.11.2018

Fecha de concesión:

08.01.2019

45 Fecha de publicación de la concesión:

15.01.2019

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2017/070441

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE MURCIA (100.0%)

Avda. Teniente Flomesta s/n

30003 Murcia (Murcia) ES

72 Inventor/es:

ARTAL SORIANO, Pablo;

MOMPEAN ESTEBA, Juan y

ARAGÓN, Juan Luis

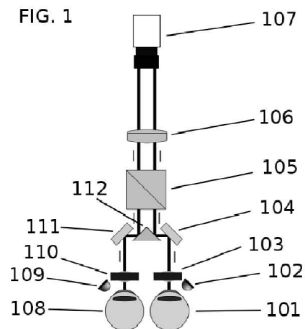
74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

54 Título: **Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia**

57 Resumen:

Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección automática de la presbicia. El instrumento incorpora dos lentes optoelectrónicas (103, 110; 203, 204) y un subsistema de toma de imágenes que capturan imágenes del ojo. Mediante el seguimiento pupilar, que se realiza procesando las imágenes del ojo, el sistema es capaz de determinar la profundidad a la que el sujeto está mirando. El seguimiento pupilar se lleva a cabo a muy alta velocidad, usando tarjetas gráficas de gran rendimiento y un algoritmo altamente paralelizado de detección de pupilas.



ES 2 659 087 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP 11/1986.

DESCRIPCIÓN

Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un instrumento binocular optoelectrónico para la corrección automática de la presbicia en el ojo en tiempo real y sin intervención del sujeto.

5 Antecedentes de la invención

La presbicia o vista cansada afecta al 100% de la población por encima de 50 años. Esto es debido a que es un proceso natural ligado al envejecimiento que hace que el ojo pierda su capacidad de acomodación con la edad. Por tanto, la corrección de la presbicia es un tema de interés mundial y que tiene un enorme mercado potencial.

10 Siendo un problema tan extendido se han planteado gran cantidad de soluciones. Sin embargo, las más extendidas hasta ahora son parciales y estáticas. La solución más simple disponible actualmente es el uso de gafas monofocales para visualizar objetos cercanos. Estas gafas normalmente cuentan con una graduación moderada que permite leer textos de cerca, pero desenfoca los objetos lejanos. Una solución que permite la visión de cerca y de
15 lejos con las mismas gafas son las lentes bifocales o progresivas. Sin embargo, estas lentes también presentan problemas de adaptación relacionados con la visión estéreo y el entrenamiento que requiere utilizar la zona de la lente adecuada para mirar de cerca o de lejos.

Otra aproximación que ha sido utilizada de una forma bastante amplia es la monovisión; con
20 esta técnica se fija el punto de enfoque de un ojo en el infinito y el del otro ojo en un punto cercano. De esta forma el cerebro selecciona la imagen de un ojo u otro según quiera ver objetos de cerca o de lejos. Sin embargo, esto presenta grandes deficiencias ya que limita en gran medida las distancias que el ojo puede enfocar correctamente e impide la sumación de las imágenes de los dos ojos y la visión estereoscópica.

25 Se han propuesto algunos sistemas con lentes optoelectrónicas como el descrito en el documento US20120133891A1, donde se propone el uso de lentes optoelectrónicas para corregir la miopía (no la presbicia) utilizando un sensor CMOS modificado para hacer un seguimiento del reflejo de la córnea.

En el documento US8690321B2 se muestra un uso de las lentes optoelectrónicas para corregir la presbicia en el que se utiliza una cámara externa al sistema que se encarga de hacer el seguimiento de la cara y de los ojos del sujeto para posteriormente transmitir la información obtenida a las gafas. Esta invención está muy limitada al depender de una cámara externa al sistema para su funcionamiento.

En el documento WO2014179857A1 se propone un sistema con lentes ajustables que utilizan la dirección de mirada para determinar la potencia óptica a aplicar, estableciendo una serie de valores discontinuos de potencia óptica que se pueden aplicar a la lente. Estos valores discontinuos de potencia óptica pueden generar una experiencia incómoda para el sujeto.

En el documento US20120194781A1 se muestra un sistema que se propone corregir la presbicia haciendo uso de lentes de Alvarez y el reflejo de la córnea.

Por otro lado, el seguimiento pupilar es una técnica ampliamente utilizada en multitud de campos, desde el marketing hasta la medicina, pasando por los videojuegos. Es un procedimiento muy popular que sin embargo cuenta con gran cantidad de alternativas para llevarse a cabo.

Por ejemplo, se conoce una implementación algorítmica altamente paralelizada basada en el uso de tarjetas gráficas (GPUs) con el fin de realizar un seguimiento pupilar a alta velocidad y con gran precisión (véase Mompeán, J., Aragón, J. L., Prieto, P., & Artal, P. (2015, octubre). "GPU-Accelerated High-Speed Eye Pupil Tracking System", en "27th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD)", pp. 17-24, Octubre 2015).

Por otro lado, también se ha desarrollado un método para conocer la relación entre la dinámica de la pupila y la acomodación del ojo (Emmanuel Chirre, Pedro Prieto y Pablo Artal, "Dynamics of the near response under natural viewing conditions with an open-view sensor," Biomed. Opt. Express 6, 4200-4211 (2015)). Esta información se utiliza en el entrenamiento y control de las respuestas.

Sumario de la invención

El objeto de la presente invención es proporcionar un instrumento para la corrección de la presbicia o vista cansada en el ojo en tiempo real de forma binocular, automática y sin la intervención del sujeto.

5 La presente invención proporciona un instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia, que comprende:

- un sistema de seguimiento pupilar de alta velocidad, que a su vez comprende:
 - o un subsistema binocular de captación de imágenes de los ojos del sujeto sometido a la corrección de la presbicia, que comprende al menos una cámara y varias fuentes de luz dirigidas hacia los ojos, y
 - 10 o un subsistema binocular de procesado de imágenes para calcular el tamaño de la pupila de cada ojo y la distancia interpupilar, susceptible de realizar el procesado de las imágenes de ambos ojos usando una implementación de alto rendimiento basada en el uso de tarjetas gráficas (GPUs) y un algoritmo altamente paralelizado de detección de pupilas, y
- 15 - dos lentes optoelectrónicas que proporcionan una potencia óptica variable, y que son susceptibles de situarse delante de los ojos del sujeto sometido a la corrección de la presbicia, cada una delante de un ojo.

Las cámaras se utilizan para hacer el seguimiento de la pupila y las lentes se encargan de aplicar la corrección óptica deseada en cada momento.

20 El guiado de la corrección se realiza a través de la información recibida a partir de un sistema propio de seguimiento de las propiedades de tamaño, forma y posición de las pupilas del ojo.

La presente invención realiza un seguimiento continuo del tamaño y la posición de la pupila del ojo. Y utiliza esos parámetros para calcular la corrección que debe aplicar en cada momento en las lentes o sistemas optoelectrónicos u optomecánicos de foco variable. El
25 seguimiento pupilar se lleva a cabo mediante la captación de una imagen de ambos ojos con una cámara e iluminación adecuada, y el subsiguiente procesado de la imagen usando una

implementación de alto rendimiento basada en el uso de tarjetas gráficas (GPUs) y un algoritmo altamente paralelizado de detección de pupilas.

Descripción de las figuras

5 La figura 1 muestra un esquema de una realización de un instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia según la invención.

La figura 2 muestra esquema de una realización simplificada de un instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia según la invención.

La figura 3 muestra esquemáticamente el cambio de tamaño que se produce en la pupila del ojo humano al mirar un objeto lejano y un objeto cercano.

10 La figura 4 muestra esquemáticamente el cambio de posición que se produce en la pupila del ojo humano al mirar un objeto lejano y un objeto cercano.

La figura 5 muestra un esquema del método para la corrección de la presbicia en tiempo real de forma binocular, que incluye una fase de calibración y una de corrección con sus respectivas etapas.

15 La figura 6 muestra una gráfica en la que se ilustra el funcionamiento del instrumento de la invención.

La figura 7 muestra esquemáticamente el ángulo que giran los ojos al mirar un objeto cercano.

Descripción detallada de la invención

20 La invención presentada tiene relación con un método que permite la corrección automática de la presbicia de forma binocular en tiempo real, y el instrumento optoelectrónico que lo implementa. El método puede tener además tres procedimientos para el control de la corrección.

Las partes fundamentales para la implementación práctica del instrumento que permite el método se muestran de forma esquemática en las figuras 1 y 2. Siendo la figura 2 una versión simplificada del instrumento. El sistema de la figura 1 incorpora dos leds de iluminación infrarroja 102, 109; la iluminación es necesaria para que la cámara 107 pueda capturar imágenes de calidad. Así mismo, el sistema cuenta con dos lentes optoelectrónicas 103,110 que se sitúan delante de los ojos del sujeto 101, 108 y que son las encargadas de aplicar la potencia óptica necesaria para el sujeto en cada momento. Por otra parte, el sistema cuenta con varios espejos 104, 105, 111, 112 y una lente 106 para enfocar correctamente la imagen de las pupilas en la cámara. De esta forma el sistema captura imágenes de forma continua que son procesadas por el subsistema de procesado de imágenes. Se utiliza una implementación algorítmica paralelizada de alto rendimiento para realizar el seguimiento pupilar haciendo uso para ello de tarjetas gráficas (GPUs). Con la información obtenida sobre el tamaño y posición de ambas pupilas se calcula la potencia óptica que las lentes 103, 110 tienen que aplicar para corregir la presbicia del sujeto. Y finalmente aplicar dicha corrección al sujeto mediante las lentes optoelectrónicas 103, 110.

La figura 2 muestra de forma esquemática una versión simplificada del instrumento optoelectrónico que presenta esta invención. El sistema incorpora dos leds de iluminación infrarroja 207, 208; la iluminación es necesaria para que las cámaras 202, 205 capturen imágenes de calidad. Por otra parte se incorporan dos lentes optoelectrónicas 203, 204 delante de los ojos del sujeto 201, 206. De igual manera que en la versión no simplificada, el sistema captura imágenes de forma continua que son procesadas por el subsistema de procesado de imágenes. Con la información obtenida se calcula la potencia óptica que las lentes 203, 204 tienen que aplicar para corregir la presbicia del sujeto. Y finalmente aplicar dicha corrección al sujeto mediante las lentes optoelectrónicas 203, 204.

La pupila del ojo humano se contrae y se dilata al enfocar estímulos en función de la distancia a la que se encuentran. En la figura 3 se muestra de forma esquemática la contracción de la pupila del ojo al mirar objetos cercanos (302) y la dilatación de la pupila del ojo al mirar objetos lejanos (301). Este fenómeno se utiliza en el método descrito para calcular la distancia a la que el sujeto está mirando y de esa forma determinar la potencia óptica que es necesario aplicar a las lentes, siendo este uno de los tres procedimientos presentados para llevar a cabo dicho cálculo. Durante la calibración se almacenan los tamaños de la pupila mientras el sujeto mira estímulos cercanos y lejanos, que se utilizan después durante la fase de corrección para interpolar la distancia a la que el sujeto está mirando. Para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$D = d_{\text{cerca}} + [(d_{\text{lejos}} - d_{\text{cerca}}) / (t_{\text{lejos}} - t_{\text{cerca}})] * (t_{\text{actual}} - t_{\text{cerca}})$$

De igual modo el ojo humano converge y diverge al enfocar estímulos en función de la distancia a la que se encuentran. En la figura 4 se muestra de forma esquemática la convergencia de la pupila del ojo al mirar objeto cercanos (402) y la divergencia de la pupila del ojo al mirar objetos lejanos (401). Este fenómeno se utiliza en el método descrito para calcular la distancia a la que el sujeto está mirando y de esa forma determinar la potencia óptica que es necesario aplicar a las lentes, siendo este otro de los tres procedimientos presentados para llevar a cabo dicho cálculo. Para calcular la distancia a la que está mirando el sujeto utilizando la distancia interpupilar se hace uso de esta fórmula:

10
$$D = (H/2) * \tan(90 - \alpha), \text{ siendo } \alpha = \text{atan}(d/r),$$

en la que d es la distancia que se han desplazado las pupilas, α es el ángulo que han girado los ojos, r es el radio del ojo y H es la distancia interpupilar del sujeto mientras mira al infinito,

En primer lugar se calcula el ángulo α que se han girado los ojos al mirar un objeto cercano. Para ello se hace uso de la distancia d que se han desplazado las pupilas y el radio r del ojo. Una vez calculado el ángulo α que se ha girado el ojo es posible calcular la distancia D a la que está mirando el sujeto utilizando la fórmula anterior., si bien es necesario que previamente se haya medido la distancia interpupilar H del sujeto mientras este mira al infinito.

20 Una tercera aproximación más precisa para determinar la distancia a la que está mirando el sujeto consiste en combinar la información obtenida tanto del tamaño de las pupilas como de la vergencia de las pupilas. Adicionalmente es posible utilizar información de las propiedades dinámicas temporales de la pupila que están relacionadas con la distancia de los objetos para obtener información de la potencia óptica requerida. Se trata, pues, de un
25 procedimiento de “aprendizaje”.

El método descrito en la presente invención se muestra en forma de diagrama en la figura 5. En primer lugar se lleva a cabo una calibración del sujeto (501). Para ello se le pide que mire un objeto lejano (502), mientras mira dicho objeto se capturan una serie de imágenes (503), y finalmente se procesan dichas imágenes con el subsistema de procesado de imágenes

para calcular el tamaño de la pupila y la distancia interpupilar (504). Después se le pide al sujeto que mire un objeto cercano (505), se captura otra serie de imágenes (506), y se procesan dichas imágenes con el subsistema de procesado de imágenes para calcular el tamaño de las pupilas así como la distancia interpupilar. La información de la fase de calibración puede utilizarse en procesos de aprendizaje y optimización automáticos. En segundo lugar se da paso (508) a la fase de corrección (509). La fase de corrección 509 funciona de modo continuo comenzando siempre con la captura de una imagen de las pupilas del sujeto (510), seguido del procesamiento de dicha imagen por parte del subsistema de procesado de imágenes para obtener el tamaño de las pupilas y la distancia interpupilar (511). Tras ello se calcula la corrección a aplicar (512) mediante uno de los tres procedimientos descritos. Y finalmente se aplica la nueva potencia óptica calculada a las lentes optoelectrónicas (513) para enfocar el objeto correctamente al sujeto.

A modo de ejemplo se incluye una gráfica en la figura 6 en la que se ilustra el funcionamiento del sistema. En la gráfica el eje X representa el tiempo, el eje Y izquierdo es la escala del tamaño y la distancia entre las pupilas en milímetros, y el eje Y derecho representa la escala de las dioptrías aplicadas en la lente. La primera línea en el gráfico (601) representa la distancia entre las pupilas a lo largo del tiempo; la segunda línea (602) representa el radio de la pupila; mientras que la tercera línea (603) representa las dioptrías aplicadas a las lentes optoelectrónicas. Se puede observar cómo al aumentar la distancia entre las pupilas aumenta también su tamaño y disminuye la cantidad de dioptrías aplicadas a las lentes. De la misma forma se observa que, al disminuir la distancia entre las pupilas y disminuir el tamaño de la pupila, aumentan las dioptrías aplicadas a las lentes optoelectrónicas.

La implementación del sistema de seguimiento pupilar usando un algoritmo altamente paralelizado mediante el uso de tarjetas gráficas (GPUs) proporciona una muy alta velocidad, permitiendo el procesado de una gran cantidad de muestras por segundo. Esta velocidad de procesado permite que el sistema responda con gran velocidad, robustez y precisión a los cambios de las pupilas del sujeto reduciendo la latencia total del sistema y mejorando la experiencia del sujeto. El algoritmo de seguimiento pupilar basa su funcionamiento en la búsqueda del borde de la pupila del ojo. En primer lugar se realiza un preprocesado en la imagen capturada para eliminar los reflejos producidos por la iluminación infrarroja y reducir el ruido que pueda haber en la imagen. A continuación, se parte de una posición inicial desde la que se exploran los píxeles de su alrededor buscando cambios significativos en el gradiente, ya que el borde de la pupila suele presentar un cambio

significativo en él. Finalmente se seleccionan aleatoriamente algunos puntos entre los que se han encontrado y se realizan varios ajustes a una elipse. Para elegir la elipse que mejor se ajusta a la pupila se calcula la distancia entre las elipses y los puntos encontrados anteriormente, y se selecciona la que tenga una distancia menor.

5 En resumen, el método descrito para la corrección binocular de la presbicia emplea un instrumento binocular optoelectrónico para la corrección binocular de la presbicia de los descritos, y comprende una primera fase de calibración y una segunda fase de corrección de la presbicia con las siguientes etapas:

a) Fase de calibración:

10 - el sujeto sometido a la corrección de la presbicia mira un objeto lejano situado a una distancia d_{lejos} ,

- se toman imágenes mediante el subsistema de captación de imágenes,

- las imágenes tomadas son procesadas mediante el subsistema de procesado de imágenes y se calcula el tamaño de la pupila t_{lejos} y la distancia interpupilar,

15 - el sujeto sometido a la corrección de la presbicia mira un objeto cercano situado a una distancia d_{cerca} ,

- se toman imágenes mediante el subsistema de captación de imágenes,

- las imágenes tomadas son procesadas mediante el subsistema de procesado de imágenes y se calcula el tamaño de la pupila t_{cerca} y la distancia interpupilar,

20 b) Fase de corrección de la presbicia:

- se toman imágenes de la pupila del sujeto mediante el subsistema de captación de imágenes,

- las imágenes tomadas son procesadas mediante el subsistema de procesado de imágenes y se calcula el tamaño de la pupila t_{actual} y la distancia interpupilar,

- cálculo de la distancia D a la que el sujeto está mirando, mediante una de las siguientes fórmulas:

$$D = d_{\text{cerca}} + [(d_{\text{lejos}} - d_{\text{cerca}}) / (t_{\text{lejos}} - t_{\text{cerca}})] * (t_{\text{actual}} - t_{\text{cerca}})$$

$$D = (H/2) * \tan(90 - \alpha), \text{ siendo } \alpha = \text{atan}(d/r),$$

5 en el que d es la distancia que se han desplazado las pupilas, α es el ángulo que han girado los ojos, r es el radio del ojo y H es la distancia interpupilar del sujeto mientras mira al infinito,

- cálculo de la potencia óptica a aplicar en las lentes optoelectrónicas (103, 110; 203, 204) a partir de la distancia D, y

10 - aplicación de la potencia óptica calculada en las lentes optoelectrónicas (103, 110; 203, 204),

en el que las etapas de la fase de corrección de la presbicia se realizan de modo continuo sucesivas veces.

15 En dicho método el algoritmo altamente paralelizado de detección de pupilas puede realizar la siguiente secuencia de actuaciones:

- preprocesado en la imagen capturada para eliminar los reflejos producidos por la iluminación y reducir el ruido que pueda haber en la imagen;

20 - a continuación, se parte de una posición inicial desde la que se exploran los píxeles de su alrededor buscando cambios significativos en el gradiente, que puedan ser indicativos del borde de la pupila;

- se seleccionan aleatoriamente algunos puntos entre los que se han encontrado y se realizan varios ajustes a una elipse; y

- para elegir la elipse que mejor se ajusta a la pupila se calcula la distancia entre las elipses y los puntos encontrados anteriormente, y se selecciona la que tenga una distancia menor.

5 Las siguientes referencias numéricas se vinculan a los distintos elementos y pasos descritos y representados en el presente documento:

101. Ojo derecho del sujeto.

102. Led de iluminación infrarroja.

103. Lente optoelectrónica.

104. Espejo plano.

10 105. Espejo dicróico.

106. Lente.

107. Cámara para seguimiento de las pupilas.

108. Ojo izquierdo del sujeto.

109. Led de iluminación infrarroja.

15 110. Lente optoelectrónica.

111. Espejo plano.

112. Espejo prisma.

201. Ojo derecho del sujeto.

202. Cámara para seguimiento de las pupilas.

203. Lente optoelectrónica.
204. Lente optoelectrónica.
205. Cámara para seguimiento de las pupilas.
206. Ojo izquierdo del sujeto.
- 5 207. Led de iluminación infrarroja.
208. Led de iluminación infrarroja.
301. Pupilas del sujeto mirando un objeto lejano.
302. Pupilas del sujeto mirando un objeto cercano.
401. Pupilas del sujeto mirando un objeto lejano.
- 10 402. Pupilas del sujeto mirando un objeto cercano.
501. Fase de calibración.
502. Estado de mirar lejos.
503. Estado de tomar imagen.
504. Estado de medir la pupila.
- 15 505. Estado de mirar cerca.
506. Estado de tomar imagen.
507. Estado de medir la pupila.
508. Paso a fase de corrección.

509. Fase de corrección.

510. Estado de tomar imagen.

511. Estado de medir la pupila.

512. Estado de calcular la corrección.

5 513. Estado de aplicar la corrección en las lentes.

601. Línea que representa la distancia interpupilar.

602. Línea que representa el radio de la pupila.

603. Línea que representa las dioptrías aplicadas en la lente.

701. Esquema del desplazamiento de un ojo humano al converger la mirada.

REIVINDICACIONES

1.- Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia, caracterizado por que comprende:

- un sistema de seguimiento pupilar de alta velocidad, que a su vez comprende:

5 o un subsistema binocular de captación de imágenes de los ojos del sujeto sometido a la corrección de la presbicia, que comprende al menos una cámara (107; 202, 205) y varias fuentes de luz (102, 109; 207, 208) dirigidas hacia los ojos, y

10 o un subsistema binocular de procesado de imágenes para calcular el tamaño de la pupila de cada ojo y la distancia interpupilar, susceptible de realizar el procesado de las imágenes de ambos ojos usando una implementación de alto rendimiento basada en el uso de tarjetas gráficas (GPUs) y un algoritmo altamente paralelizado de detección de pupilas, y

15 - dos lentes optoelectrónicas (103, 110; 203, 204) que proporcionan una potencia óptica variable, y que son susceptibles de situarse delante de los ojos del sujeto sometido a la corrección de la presbicia, cada una delante de un ojo.

2.- Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia, según la reivindicación 1, en el que las fuentes de luz (102, 109; 207, 208) son LEDs de iluminación infrarroja.

20 3.- Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia, según la reivindicación 1 o 2, que comprende adicionalmente varios espejos (104, 105, 111, 112) y al menos una lente (106) para enfocar la imagen de las pupilas del ojo del sujeto sometido a la corrección de la presbicia en la al menos una cámara (107; 202, 205).

4.- Instrumento binocular optoelectrónico para la corrección de la presbicia, según la reivindicación 3, en el que los espejos son espejos planos (104, 111), espejos dicróicos (105) y espejos prismas (112).

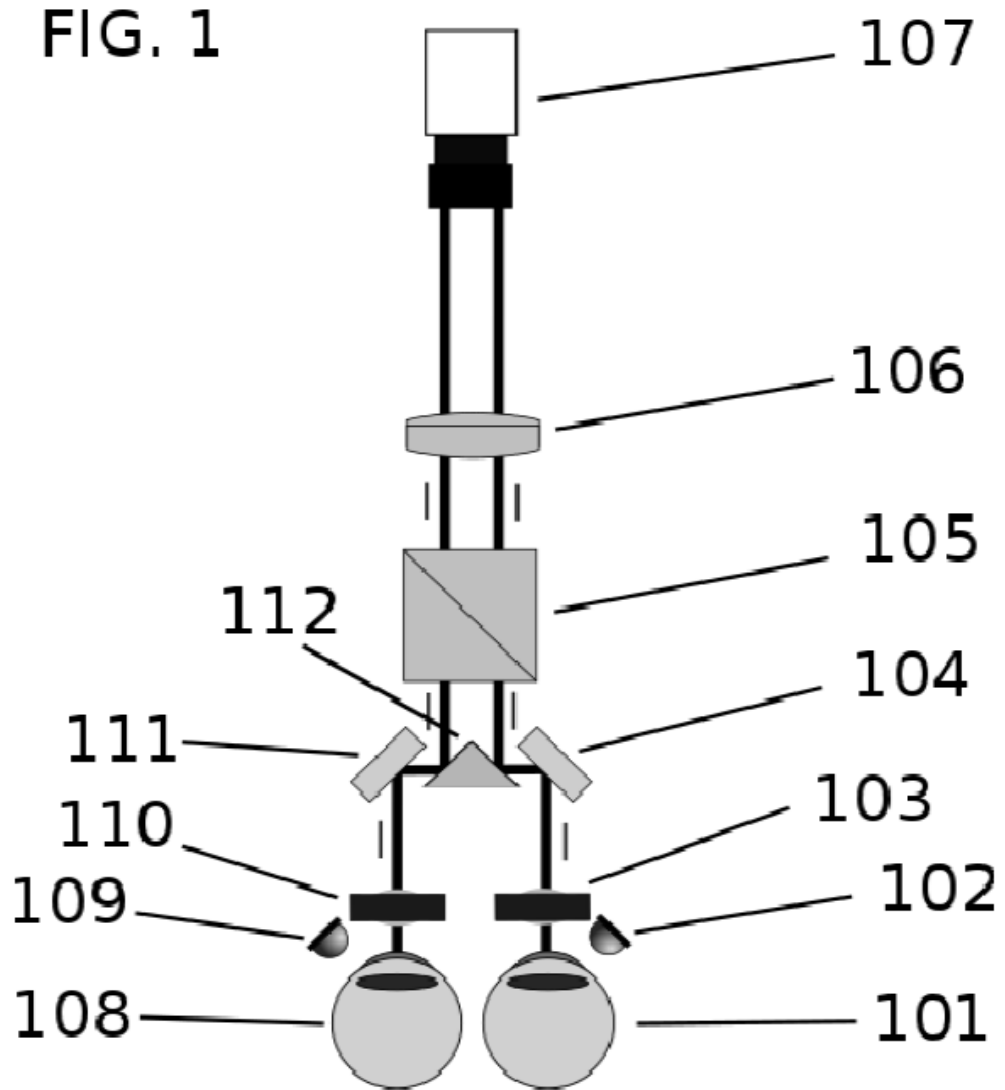


FIG. 2

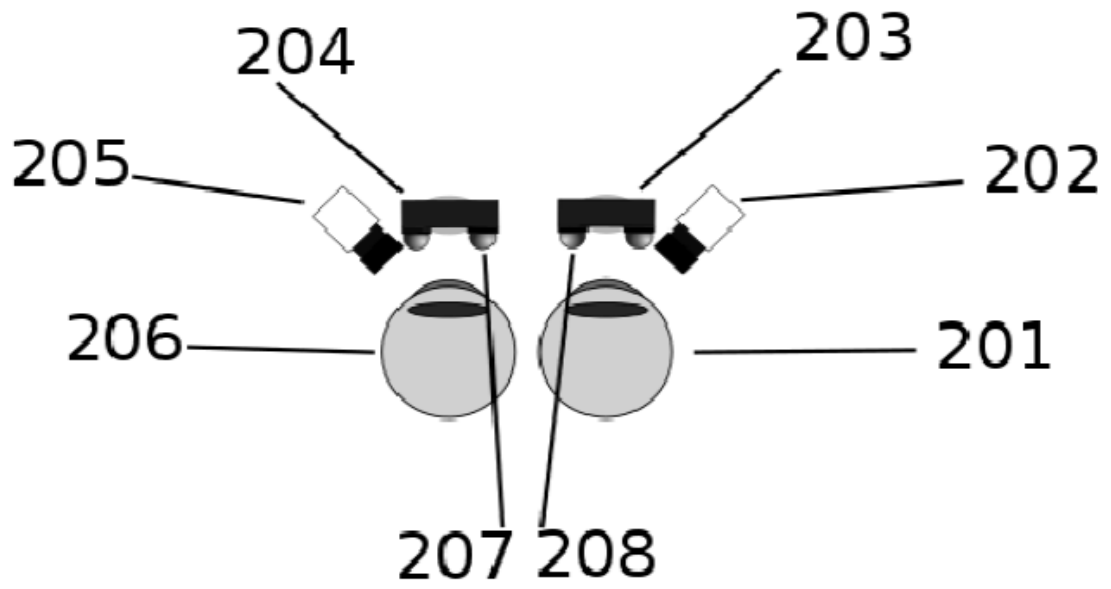


FIG 3.

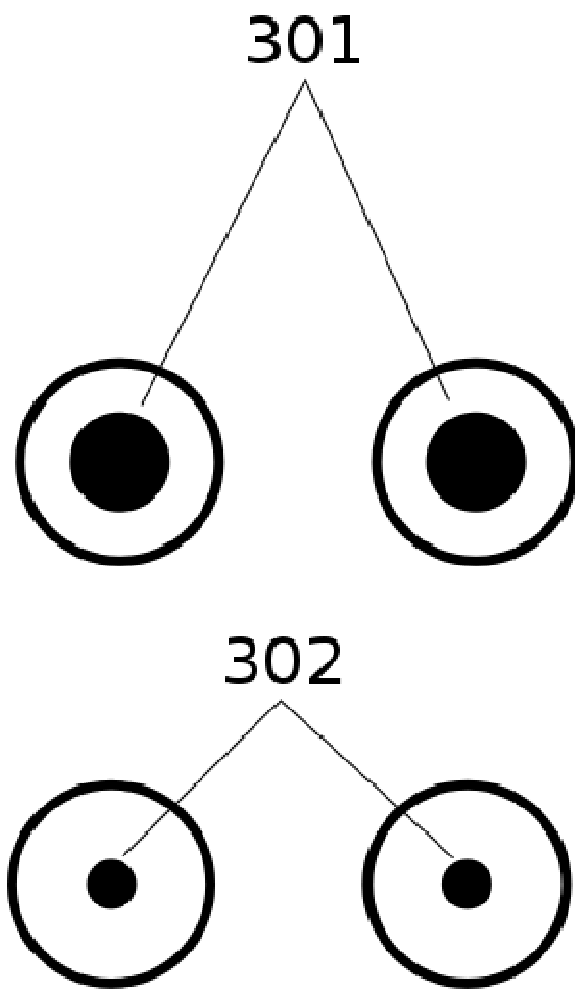
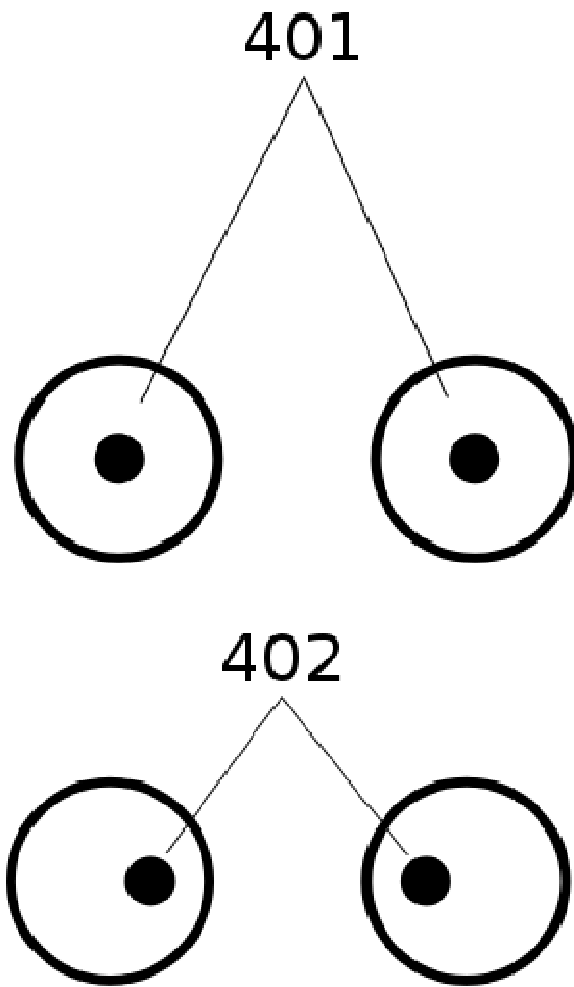


FIG 4.



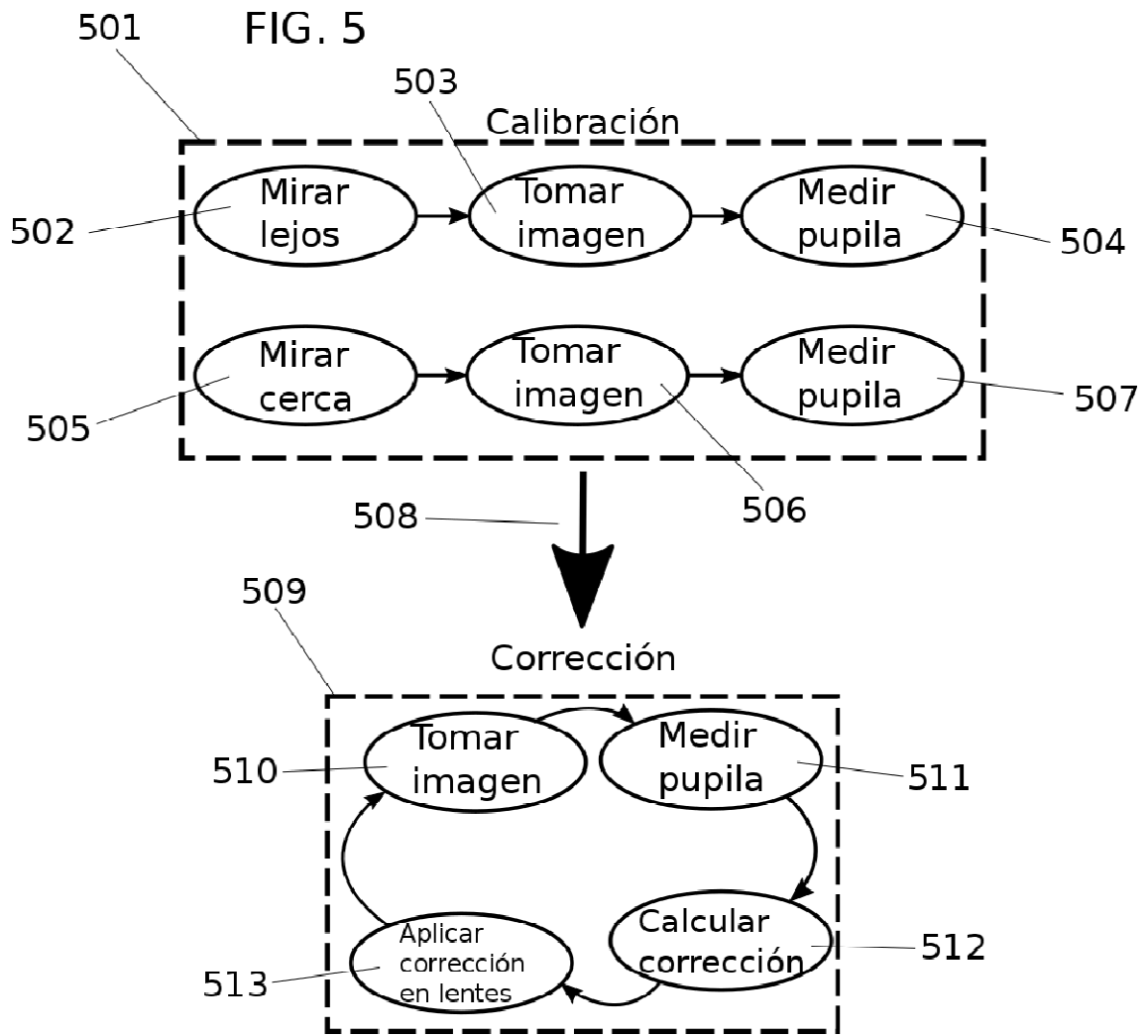


FIG. 6

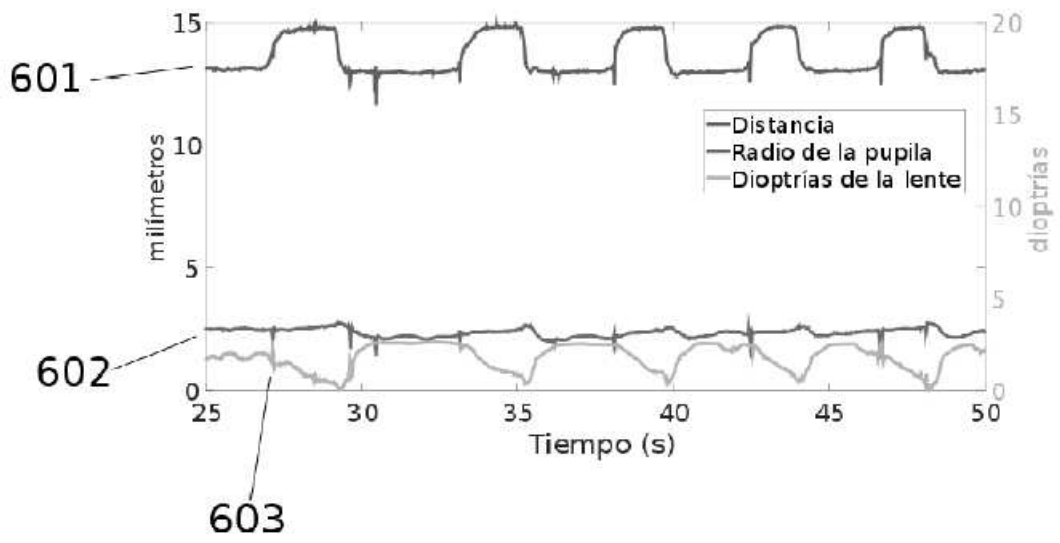


FIG. 7

