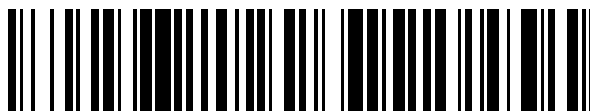


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 649 760**

51 Int. Cl.:

G01M 11/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.07.2008 PCT/EP2008/059548**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.01.2009 WO09010593**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.07.2008 E 08775271 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.08.2017 EP 2176633**

54 Título: **Procedimiento de estimación de por lo menos una deformación del frente de onda de un sistema óptico o de un objeto observado por el sistema óptico, y dispositivo asociado**

30 Prioridad:

19.07.2007 FR 0756615

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

15.01.2018

73 Titular/es:

OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA)
(100.0%)

Chemin de la Hunière
91120 Palaiseau, FR

72 Inventor/es:

CASSAING, FRÉDÉRIC;
MOCOEUR, ISABELLE y
MUGNIER, LAURENT

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 649 760 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

Procedimiento de estimación de por lo menos una deformación del frente de onda de un sistema óptico o de un objeto observado por el sistema óptico, y dispositivo asociado.

5

Campo técnico general

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo para la estimación de por lo menos una deformación del frente de onda de un sistema óptico o de un objeto observado por el sistema óptico.

10

La invención encuentra aplicación, en particular, en el campo de la formación de imágenes de alta resolución y de la conformación de haces.

15

Las deformaciones pueden ser introducidas por un sistema óptico y/o por el medio de propagación de la luz. Además, cuando el sistema óptico se degrada por deformaciones, la invención permite la estimación (restauración) del objeto observado.

Estado de la técnica

20

La calidad de las imágenes obtenidas por un instrumento óptico se degrada frecuentemente debido a la presencia de aberraciones o de otras perturbaciones sobre la trayectoria de la onda que proviene del objeto observado.

25

En efecto, estas deformaciones de fase presentes en la pupila del instrumento, atenúan la función de transferencia.

Se han desarrollado varios dispositivos denominados Analizadores de Superficie de Onda (ASO) para medir la fase pupilar transformándola en variaciones de intensidad medibles.

30

Utilizados en un sistema que funciona en bucle cerrado con un elemento que puede controlar la fase de la onda recibida (espejo deformable, convertidores de fase, etc.), estos dispositivos permiten librarse de las perturbaciones observadas. Por otro lado, las informaciones del ASO se pueden utilizar para restaurar (estimar) el objeto observado.

35

En la actualidad existe una amplia gama de ASO, se podrá hacer referencia, en particular, a G. Rousset, "Wavefront sensors, Adaptive Optics in Astronomy", bajo la dirección de F. Roddier, capítulo. 5, p. 91-130, Cambridge University Press, Cambridge 1999.

40

Para corregir las aberraciones de un sistema óptico con cualquier pupila, es decir o bien monolítica, o bien constituida por un conjunto de sub-pupilas unidas o no, las técnicas denominadas de plano focal aparecen como unas soluciones atractivas.

45

En efecto, contrariamente a los dispositivos de pupila plana que deben extraer una parte de la luz hacia una óptica auxiliar (lo cual complica el montaje óptico), los métodos del plano focal permiten la medición de las deformaciones del frente de onda, así como la combinación de todas las sub-pupilas en una sola trama, y esto con un diseño opto-mecánico simple.

50

Puesto que los instrumentos de formación de imágenes están naturalmente equipados con una cámara en el plano focal, es ventajoso utilizar un ASO cerca de esta cámara para medir las deformaciones del instrumento.

Un dispositivo de plano focal se divulga en el documento US 2004/0052426.

55

Aunque se conoce la pupila de entrada del instrumento, la técnica denominada "Phase Retrieval" permite estimar las aberraciones que son las más compatibles con las restricciones conocidas en el plano de pupila y en el plano focal, con el único dato de la imagen focal de un punto de origen. Sin embargo, se debe emplear esta técnica para instrumentos que presenten unas configuraciones pupilares no centro-simétricas con el fin de estimar las deformaciones (o la "fase aberrante") sin ambigüedad de signo.

60

En el caso contrario, o para una observación sobre objeto extendido, el único dato de la imagen focal es insuficiente para encontrar de manera única las aberraciones.

65

En un caso general (objeto desconocido y/o configuración cualquiera), es posible levantar la indeterminación en la fase utilizando varias imágenes denominadas de diversidad obtenidas cerca del plano focal en presencia de una deformación (o modulación) de fase perfectamente conocida; la mayoría de las veces, se trata de una (incluso de varias) imagen(es) desenfocada(s) por razones de simplicidad de realización.

La estimación de la fase aberrante se basa entonces en un enfoque que consiste en seleccionar las aberraciones que minimizan un criterio de distancia a las imágenes.

5 Se buscan por lo tanto las deformaciones que producen un modelo de imagen lo más próximo de los datos, efectuándose la minimización generalmente en el plano de Fourier.

Este método, denominado de la diversidad de fase, "phase diversity" en inglés, se aplica comúnmente a la medición de fase sobre objeto extendido.

10 Sin embargo, este método permite estimar el objeto observado. En otras palabras, se restaura el objeto observado librándose de las deformaciones.

15 Sin embargo, ya sea para la estimación del objeto o de las aberraciones, un método de este tipo necesita unos tiempos de cálculo importantes que son difícilmente compatibles con las exigencias de un sistema de estimación en tiempo real.

En efecto, si N es el número de imágenes adquiridas por diversidad, se efectúan como mínimo 2N transformadas de Fourier en cada iteración, sabiendo que, en la práctica, pueden ser necesarias unas cincuenta iteraciones.

20 Por lo tanto, se han llevado a cabo varios estudios con el fin de reducir el número de iteraciones necesarias:

- en primer lugar, al intentar encontrar mejores algoritmos de minimización para unos ensayos de estimulación efectuados sobre unas configuraciones monolíticas,
- 25 - después por modificación del criterio utilizado, con unos estudios realizados para un telescopio monolítico o segmentado.

30 Estos procedimientos necesitan varias iteraciones antes de converger y presentan, por lo tanto, unos tiempos de cálculo que aumentan con el número de aberraciones a buscar. En consecuencia, también son importantes, los tiempos de cálculo para estimar el objeto observado.

35 Se ha realizado algunas veces la medición de las aberraciones débiles (es decir residuales) en bucle cerrado pero solamente para configuraciones monolíticas (es decir para la medición de las deformaciones de orden superior al desenfocado) y sin ninguna caracterización precisa de las prestaciones del sensor.

Todos estos procedimientos iterativos necesitan por lo tanto unas potencias de cálculo significativas.

40 Ahora bien, la utilización de procesadores adecuados, que no plantean *a priori* ningún problema para los instrumentos en el suelo, se vuelve crítica para aplicaciones embarcadas en las que la potencia del calculador es limitada.

Presentación de la invención

45 La invención tiene como objetivo estimar deformaciones de un frente de onda de un sistema de observación o del objeto observado por el sistema a partir de una o varias imágenes tomadas cerca del plano focal de un sistema de observación mediante un procedimiento no iterativo, sino puramente analítico.

50 Así, según un primer aspecto, la invención se refiere a un procedimiento de estimación de por lo menos una deformación del frente de onda de un sistema de observación o de un objeto observado por el sistema.

55 En particular, el procedimiento de la invención se caracteriza por que: se adquiere, cerca del plano focal del sistema de observación, por lo menos una imagen de diversidad en por lo menos un plano de diversidad, comprendiendo la imagen de diversidad una deformación de diversidad conocida; y por que en cada plano de diversidad se determina un modelo de imagen basado en por lo menos: una descomposición de la transmisión pupilar de la pupila física del sistema en una pluralidad de sub-pupilas; una descomposición sobre cada sub-pupila de la deformación buscada en forma de por lo menos una deformación conocida ponderada por unos coeficientes a determinar; una determinación de la función de transferencia óptica del sistema por autocorrelación de la transmisión pupilar de su pupila; la linealización, en dicha función de transferencia óptica, de cada uno de los términos de la autocorrelación en función de los coeficientes de la deformación buscada, efectuándose la linealización cerca de la deformación de diversidad conocida; el objeto observado y el ruido; y por que a partir del o de los modelos de imágenes determinadas y de la o las imágenes adquiridas, se estima la o las deformaciones buscadas o el objeto observado.

65 El modelo de imagen depende además del objeto observado por el sistema y de la función de transferencia linealizada.

El procedimiento de la invención se aplica a un objeto extendido y no necesita ninguna iteración, minimizando en consecuencia el tiempo de cálculo.

5 El procedimiento de la invención se basa en la linealización de la función de transferencia del sistema de observación. Una linealización de este tipo permite obtener una estimación de las deformaciones o del objeto observado.

10 En particular, la función de transferencia del sistema de observación se linealiza en cada plano de diversidad y depende por lo menos de la o de las deformaciones buscadas y de la deformación de diversidad conocida asociada a cada plano de diversidad.

15 Con las soluciones tales como las conocidas es posible estimar las deformaciones, pero con unos tiempos de cálculo consecuentes debido a que en estas soluciones la estimación se basa en la minimización de un criterio de distancia, efectuada de manera iterativa. Además, con estas soluciones, no es posible estimar directamente el objeto observado en una iteración.

20 El hecho de utilizar un modelo de imagen que depende de la función de transferencia del sistema linealizado en cada plano de diversidad del sistema, permite simplificar el sistema de ecuaciones a dos incógnitas (el objeto y las perturbaciones) con el fin de resolver, sin iteración, o el objeto o las perturbaciones (la fase).

De manera preferida, el sistema de observación es un sistema de observación óptico y la función de transferencia del sistema es la función de transferencia óptica, formación de imágenes acústicas.

25 Además, según un segundo aspecto, la invención se refiere a un dispositivo de estimación de por lo menos una deformación del frente de onda de un sistema de observación o de un objeto observado por el sistema.

30 El dispositivo de la invención se caracteriza por que comprende unos medios para adquirir, cerca del plano focal del sistema de observación, por lo menos una imagen de diversidad en por lo menos un plano de diversidad, comprendiendo la imagen de diversidad una deformación de diversidad conocida; y por que en cada plano de diversidad, el dispositivo comprende: unos medios para determinar un modelo de imagen basado en por lo menos: una descomposición de la pupila física del sistema en una pluralidad de sub-pupilas; una descomposición sobre cada sub-pupila de la deformación buscada en forma de por lo menos una deformación conocida ponderada por unos coeficientes a determinar; una determinación de la función de transferencia del sistema por autocorrelación de su pupila; la linealización de cada uno de los términos de la autocorrelación en función de los coeficientes de la deformación buscada, efectuándose la linealización cerca de la deformación de diversidad conocida; el objeto observado y el ruido; y por que a partir del o de los modelos de imágenes determinados y de la o de las imágenes adquiridas, se estiman la o las deformaciones buscadas o el objeto observado.

40 Debido a que el dispositivo es adecuado para realizar un procedimiento que no necesita iteración, éste respeta fuertes restricciones en tiempo real y se integra perfectamente en unos sistemas embarcados.

45 El dispositivo de la invención se puede utilizar en bucle cerrado en conjunción con unos medios de corrección, para la corrección en tiempo real de las deformaciones del frente de onda de un sistema óptico y/o para estimar además el objeto observado por el sistema de observación.

Finalmente, la invención se refiere, según un tercer aspecto, a un sistema embarcado que comprende unos medios para realizar el procedimiento según el primer aspecto de la invención.

50 **Presentación de las figuras**

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán también a partir de la descripción siguiente, la cual es puramente ilustrativa y no limitativa y debe ser leída con respecto a los dibujos adjuntos, en los que:

- 55 - la figura 1 ilustra un dispositivo de estimación de las deformaciones del frente de onda de acuerdo con la invención;
- la figura 2 ilustra una variante del dispositivo de la invención para la estimación del objeto observado;
- 60 - la figura 3 ilustra una configuración con tres sub-pupilas;
- las figuras 4a y 4b ilustran, respectivamente, una configuración con tres sub-pupilas de un sistema óptico y la función de transferencia asociada a aberraciones nulas;
- 65 - la figura 5 ilustra un primer modo de realización del procedimiento de la invención para la estimación de las deformaciones:

- la figura 6 ilustra un segundo modo de realización del procedimiento de la invención para la estimación de las deformaciones;
- 5
- la figura 7 ilustra la estimación del objeto observado para una configuración con 18 sub-pupilas que se parecen a un telescopio monolítico.

Descripción de uno o varios modos de realización y de utilización

10 La figura 1 ilustra un dispositivo de estimación de las deformaciones del frente de onda de un sistema óptico o de un objeto observado por un sistema óptico.

15 Las deformaciones incidentes y/o de posicionamiento 10 de un sistema óptico 20 (representado en la presente memoria a título de ejemplo como un instrumento de formación de imágenes ópticas) son estimadas por un procedimiento analítico implementado en unos medios de cálculo 30 del dispositivo 1.

Las aberraciones así estimadas 40 pueden entonces ser redirigidas eventualmente hacia el sistema óptico 20 para ser corregidas.

20 El procedimiento analítico permite también restaurar el objeto 50.

Se debe observar que el instrumento de observación puede ser monolítico o de pupila segmentada 21.

25 En el caso de pupila segmentada, el dispositivo puede estar aguas abajo de un sistema de recombinación de los haces 23.

Un sensor 25, instalado en este caso cerca de un sensor de formación de imágenes 24, genera por lo menos una imagen de diversidad 26 en unas condiciones de fase perfectamente conocidas.

30 Se debe observar que si el objeto es desconocido, son necesarias varias imágenes de diversidad 27, 28.

Una imagen de diversidad es una imagen en la que se añade una deformación de diversidad conocida.

35 Debido a las aberraciones presentes en la trayectoria óptica de la luz, la fase aberrante sobre el sensor de formación de imágenes, indicada como φ_c , puede ser diferente de la vista por el sensor, indicada como φ_s .

Como el objeto observado puede ser cualquiera, el procedimiento de medición no necesita la introducción de una fuente de referencia; las imágenes proceden por lo tanto directamente del objeto observado.

40 Son adquiridas mediante uno o varios sensores, por ejemplo compuestos por matrices de tipo CCD o CMOS, preferentemente con un muestreo de Shannon.

Se debe observar que a partir de un objeto observado, se puede:

- 45
- adquirir una imagen a partir de la cual se añadirá una o varias deformaciones conocidas, con el fin de obtener las imágenes de diversidad,
 - adquirir simultáneamente (si es posible o, en el peor de los casos, durante un tiempo suficientemente corto) tantas imágenes de diversidad como se desee.
- 50

La medición de las aberraciones del frente de onda se basa en la utilización de las imágenes adquiridas que contienen la fase aberrante φ_s , así como las deformaciones de diversidad.

55 Las aberraciones así estimadas 40 pueden entonces ser corregidas eventualmente por unos medios de corrección 22, por ejemplo un espejo deformable.

Durante el procedimiento, se modelizan las imágenes adquiridas en función de las deformaciones buscadas del objeto así como del conjunto de los parámetros físicos pertinentes, como la modulación de fase introducida y las características ópticas de detección del sistema óptico.

60 A continuación, en un plano de diversidad marcado con d se introduce una fase φ_d perfectamente conocida, y se considerarán unas deformaciones que producen una fase φ_a (respectivamente φ_{dn} y φ_{an} en cada sub-pupila).

Se entiende por plano de diversidad d, el sitio en el que se adquiere una imagen de diversidad.

65 Se trata, por lo tanto, de una imagen focal en presencia de una eventual aberración adicional conocida, como por

ejemplo un desenfoque. Un plano de diversidad puede en este caso ser un plano extrafocal, la deformación de diversidad conocida es entonces en este caso un desenfoque.

Sin embargo, la deformación de diversidad puede ser cualquiera.

La figura 2 ilustra un modo de realización para la estimación del objeto observado.

Se generan por lo menos dos imágenes de diversidad 25, o bien sobre unos sensores separados, o bien sobre el mismo sensor. En este último caso, la adquisición de las imágenes se puede realizar de manera secuencial. La figura 2 ilustra un cronograma de la adquisición de las imágenes de manera secuencial. Para ello, el bloque 25 hace intervenir en el tren óptico cualquier sistema que permita introducir una deformación de diversidad. Un sistema de este tipo puede ser una membrana, un espejo bimorfo, un sistema electroóptico, etc.

El procedimiento de estimación del objeto observado se realiza mediante un circuito impreso dedicado que tiene en cuenta los parámetros del sistema óptico (forma de la pupila, longitud de onda de observación, etc.) y que permite estimar el objeto observado 50 sobre todas las tramas de dos imágenes (véase la figura 2).

La figura 3 ilustra una configuración con $N_T=3$ sub-pupilas.

Sea p la transmisión de la configuración pupilar, compuesta por N_T sub-pupilas colocadas en la posición u_n y que presentan cada una, una fase indicada como φ_n .

La transmisión pupilar se da mediante:

$$p_d = \sum_{n=1}^{N_T} \Pi \exp j(\phi_{dn} + \phi_{an}) * \delta_{u_n}, \quad (1)$$

con $j^2=-1$.

Se señala que también se efectúa la descomposición mencionada anteriormente (véase la ecuación (1)), incluso si el instrumento comprende sólo una pupila.

Si la fase aberrante es nula, la transmisión de la pupila es perfecta y vale 1.

Se debe observar que la forma de la pupila o de las sub-pupilas puede ser cualquiera, por ejemplo circular, hexagonal o cuadrada, etc.

Las fases aberrantes se pueden expresar en diferentes bases de deformaciones conocidas, por ejemplo la base de los polinomios de Zernike:

$$\varphi_{an}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{N_z} a_{kn} Z_k(\mathbf{r}), \quad (2)$$

designando a_{kn} las aberraciones de orden k sobre la sub-pupila n , N_z , el número de polinomios considerados (es decir el número de coeficientes buscados).

Las ecuaciones (1) y (2) permiten descomponer la pupila y la fase en una base conocida de antemano. Queda entonces buscar los coeficientes a_{kn} de esta doble descomposición.

A continuación, se indicará como a el vector de tamaño $N_a \times 1$ cuyos elementos a_{kn} son las aberraciones buscadas, siendo N_a el número de incógnitas buscadas igual a $N_T \times N_z$. Por ejemplo, para un instrumento con seis sub-pupilas ($N_T=6$) sobre el cual se buscan los tres primeros ($N_z=3$) órdenes de Zernike, se obtiene $N_a = 18$.

En el plano frecuencial, la función de transferencia óptica F_d obtenida en el $d^{\text{enésimo}}$ plano de diversidad se da mediante la autocorrelación de la pupila:

$$(p \otimes p)_d = F_d = \sum_{n=1}^{N_T} \sum_{n'=1}^{N_T} F_{d,p,n,n'} \Psi(a_{kn}, a_{kn'}, d) * \delta_{u_n - u_{n'}}. \quad (3)$$

Se debe observar que si N_T es el número de sub-pupilas, la función de transferencia óptica presenta un pico central, suma de N_T picos individuales más $N_T(N_T-1)$ picos satélites. Además, se observará que también se puede descomponer una pupila en una pluralidad de sub-pupilas.

Cada pico P_0, P_1, \dots, P_6 , en el caso en el que $N_T=3$, de la función de transferencia óptica tal como se ilustra mediante la figura 4b (el pico P_1 , que es un pico satélite, está oculto por el pico central P_0), resulta de la intercorrelación de la pupila n con la pupila n' y es el producto de dos funciones:

- 5 - una función $F_{d,n,n'}$ que contiene sólo las aberraciones de diversidad d ($F_{d,n,n'}$ representa, por lo tanto, el pico de intercorrelación sin aberración),
- una función Ψ que depende de las aberraciones buscadas y de la diversidad.

10 Si la fase sobre el sensor φ_S es débil, es posible escribir cada pico de la función de transferencia óptica como:

$$F_d = \sum_{n=1}^{N_T} \sum_{n'=1}^{N_T} F_{d,n,n'} [1 + \Psi_d(a_{kn}, a_{kn'}, d)] * \delta_{u_n - u_{n'}}, \quad \text{avec } \Psi_d = \Psi - 1, \quad (4)$$

15 que se puede linealizar con respecto a un vector x dependiente de las aberraciones. Esta linealización se puede efectuar según dos casos.

Caso nº 1

20 Si se buscan pistones y modos superiores, se puede desarrollar la expresión de Ψ_a en el primer orden cerca de las aberraciones de diversidad de la manera siguiente:

$$F_d \approx \sum_{n=1}^{N_T} \sum_{n'=1}^{N_T} F_{d,n,n'} * \delta_{u_n - u_{n'}} + \left[\sum_{n=1}^{N_T} \sum_{n'=1}^{N_T} F_{d,n,n'} \Psi_d(d) * \delta_{u_n - u_{n'}} \right] \bullet x, \quad \text{con } x = a, \quad (5)$$

25 en la que “ \bullet ” designa un producto matricial.

Caso nº 2

30 Si sólo se aplican/buscán los pistones, entonces la expresión de la función de transferencia en cada plano de diversidad es exacta y tiene como expresión:

$$F_d = \left[\sum_{n=1}^{N_T} \sum_{n'=1}^{N_T} F_{d,n,n'} * \delta_{u_n - u_{n'}} \right] \bullet x, \quad \text{con } x = \exp(j\alpha), \quad (6)$$

siendo α un conjunto de combinaciones lineales de a_{kn} y $a_{kn'}$.

35 Por lo tanto, existe una relación directa entre la forma de la función de transferencia óptica y las deformaciones que se buscan.

Una vez determinado el vector x mediante el procedimiento descrito anteriormente, y teniendo en cuenta los dos casos explicitados anteriormente, las aberraciones se deducen de x por las ecuaciones (5) y (6).

40 La transformada de Fourier de la imagen obtenida en el $d^{\text{ésimo}}$ plano de diversidad se da mediante:

$$\tilde{i}_d = \tilde{\delta} F_d + b_d, \quad (7)$$

45 con $\tilde{\cdot}$ el operador de transformada de Fourier, $\tilde{\delta}$ representa el espectro del objeto en el plano frecuencial y b_d el ruido inherente a la adquisición de la imagen i_d .

El principio de medición se basa en el hecho de que se van a buscar las deformaciones y/o el objeto que produce un modelo lo más cerca posible de las imágenes adquiridas, lo cual viene a minimizar un criterio de distancia J entre el modelo reconstruido y los datos obtenidos en cada plano. El criterio es, por ejemplo, cuadrático.

En el dominio de Fourier, este criterio se escribe:

$$J(a, o) = \sum_{v=1}^{N_f} \sum_{d=1}^{N_d} \left| \tilde{i}_d(v) - F_d(a, v) \tilde{\delta}(v) \right|^2, \quad (8)$$

55 en la que N_d es el número de planos de diversidad, N_f el número de frecuencias sobre las cuales se define la

función de transferencia óptica i_d la imagen adquirida en el $d^{\text{enérismo}}$ plano y $F_d(a,u)\delta(u)$ el modelo de imagen en el campo frecuencial.

5 Aunque el objeto sea generalmente desconocido, es posible expresarlo con una fase aberrante fija y por lo tanto librarse de este último. En efecto, la ecuación (8) es no lineal en fase, pero cuadrática en objeto. Así, con fase fija, existe una solución analítica para el objeto, que se da mediante:

$$\tilde{\delta}(a,v) = \frac{\sum_{d=1}^{N_d} F_d^*(a,v) \tilde{i}_d(v) + \sigma^2 \tilde{\delta}_m(v)}{\sum_{d=1}^{N_d} |F_d(a,v)|^2 + \beta \frac{\sigma^2}{S_0(v)}}, \quad (9)$$

10 en la que F_d^* representa el conjugado de F_d ; $\frac{\tilde{\delta}_m(v)}{S_0(v)}$ y $\beta \frac{\sigma^2}{S_0(v)}$ son unos términos relacionados con una eventual regularización sobre el objeto (si no hay regularización, estos términos son iguales a cero); además $\beta \frac{\sigma^2}{S_0(v)}$ es la relación de las densidades espectrales de potencia del ruido (σ^2) y del objeto ($S_0(u)$) ponderado por un coeficiente β (por defecto $\beta=1$) y $\tilde{\delta}_m$ representa el objeto medio.

15 A partir de la ecuación (8) es posible obtener un nuevo criterio J' que ya no depende explícitamente más que de las deformaciones buscadas:

$$J'(a) \propto \sum_{v=1}^{N_f} \frac{\left| \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{d'=1}^{d-1} \tilde{i}_d(v) F_d(a,v) - \tilde{i}_{d'}(v) F_{d'}(a,v) \right|^2}{\sum_{d=1}^{N_d} |F_d(a,v)|^2 + \beta \frac{\sigma^2}{S_0(v)}} + \text{Reg}(\tilde{\delta}_m), \quad (10)$$

20 con $\text{Reg}(\tilde{\delta}_m)$ un término de regularización que depende del objeto medio.

De manera general, la minimización del criterio J' se efectúa iterativamente con unos tiempos de cálculo significativos.

25 En sustitución del algoritmo iterativo, el procedimiento de medición utiliza un algoritmo analítico desarrollado en la hipótesis de las fases débiles ϕ_s sobre el ASO.

En particular, este algoritmo se utiliza alrededor de un punto de funcionamiento, es decir alrededor de $\phi_s - \phi_c$, o por ejemplo con fase aberrante ϕ débil (punto de funcionamiento próximo a cero).

30 Así, en el marco de la hipótesis ϕ_s débil, es posible:

- desarrollar el denominador del criterio J' en el orden cero, lo cual equivale a considerarlo como un término de ponderación independiente de las deformaciones buscadas,
- expresar el modelo de formación de imágenes como una función simple de las aberraciones, lo cual equivale a linealizar en cada plano los picos de la función de transferencia óptica cerca de las aberraciones fijas de diversidad, en otras palabras, equivale a linealizar la función de transferencia óptica dada por la ecuación (3).

40 Contrariamente a las técnicas conocidas, la linealización de cada pico permite tener en cuenta unas configuraciones compactas y redundantes (cuyos picos de la función de transferencia óptica se recubren).

Se puede expresar este criterio linealizado como:

$$45 \quad J''(\mathbf{a}) = \sum_{v=1}^{N_f} \|\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{B}\|^2. \quad (11)$$

Es decir, N_i el número de píxeles en la imagen, típicamente 128 x 128 o 256 x 256.

La función de transferencia digitalizada, es decir definida en un espacio compatible con el de la imagen registrada, por lo tanto pixelada, se define sobre N_f frecuencias, con $N_f \leq N_i$. La matriz A es por lo tanto de tamaño $N_f \times N_a$ y B es de tamaño $N_f \times 1$.

5 Como este nuevo criterio es cuadrático, las distorsiones del frente de onda pueden expresarse de manera simple:

$$\hat{x} = [\Re\{A^H A\}]^{-1} \cdot \Re\{A^H B\}, \quad (12),$$

10 en la que \Re designa el operador parcial real.

Las aberraciones buscadas se deducen a continuación de x. Para afinar el criterio, también es posible:

- 15 - tener en cuenta unos pesos diferentes entre las imágenes;
- introducir un filtrado sobre las imágenes;
- incluir una gestión de los efectos de borde para unas imágenes extendidas;
- incluir una búsqueda de basculaciones diferenciales entre las imágenes de diversidad;
- añadir unos términos de regularización.

20 Cualquier "refinado" efectuado se traduce por una modificación de las matrices A y B que intervendrán, pero el principio de base del procedimiento de medición sigue sin cambiar.

Anteriormente, se ha visto que a partir del criterio, se pueden encontrar las aberraciones; en efecto, se ha librado del objeto en la ecuación (9) expresándolo en fase aberrante fijada, y reinyectándolo en el criterio inicial dado por la ecuación (8).

Ejemplo 1

30 Si se buscan los pistones y otras aberraciones, se ha mostrado, en el caso n° 1, presentado anteriormente, que se podía desarrollar la función de transferencia óptica en el primer orden en $x = a$, así, se plantea:

$$F_d \approx L_d + M_d \quad \text{con} \quad L_d = \sum_{n=1}^{N_f} \sum_{n'=1}^{N_f} \Psi_{d,n,n'} \Psi_a(d) * \delta_{u_n - u_{n'}} \quad \text{y} \quad M_d = \sum_{n=1}^{N_f} \sum_{n'=1}^{N_f} \Psi_{d,n,n'} * \delta_{u_n - u_{n'}}. \quad (13)$$

35 con L_d la parte lineal en x y M_d la parte fija.

La expresión de las matrices A y B es entonces:

$$A = \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{d'=1}^{d-1} A_{dd'} - A_{d'd} \quad B = \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{d'=1}^{d-1} B_{d'd} - B_{dd'}, \quad (14)$$

40 con

$$A_{dd'} = \frac{\tilde{i}_d L_{d'}}{\left[\sum_{d=1}^{N_d} |M_d(0)|^2 \right]^{1/2}}, \quad (15)$$

y

$$B_{dd'} = \frac{\tilde{i}_d M_{d'}}{\left[\sum_{d=1}^{N_d} |M_d(0)|^2 \right]^{1/2}}, \quad (16)$$

45 Con la ecuación (12), el coste de cálculo es mucho menos importante que en el caso iterativo.

En efecto, la inversión de la matriz $A^H A$ no es dimensionante ya que es de tamaño $N_a \times N_a$ y que $N_a \ll N_f$; el tiempo de cálculo se resume entonces al tiempo necesario para efectuar las N_d transformadas de Fourier.

50 La figura 5 ilustra el estimador 30 (como se indica en la figura 1). Se detalla, para un caso no limitativo con dos

imágenes de diversidad señaladas como 26 y 27, un modo de realización, que permite la estimación de los pistones y modos superiores (por lo tanto desarrollo en el primer orden en función de a).

El procedimiento de estimación de las aberraciones efectúa en cada plano de diversidad:

- 5 - el cálculo de las matrices L_1, L_2 31 y M_1, M_2 32,
- L_1 y L_2 se multiplican después por la transformada de Fourier de las imágenes 27 y 26,
- 10 - designando el símbolo \odot una operación lineal, como el producto término a término o una sucesión de operaciones lineales,
- el mismo tipo de operación se efectúa con M_1 y M_2 . Se obtiene así a la salida las matrices A_{12}, A_{21} , 33 de tamaño $N_f \times N_a$ así como las matrices B_{12}, B_{21} 34 de tamaño $N_f \times 1$,
- 15 - según la ecuación 10, las matrices resultantes se restan a continuación para formar las matrices A 35 y B 36,
- la operación 37 calcula el término $[\Re\{A^H A\}]^{-1} \cdot \Re\{A^H B\}$ según la ecuación 11,
- 20 - como en el marco de este modo de realización $a = x$, las aberraciones buscadas se obtienen directamente a la salida del operador 37.

Ejemplo 2

El proceso de estimación de las aberraciones descrito anteriormente se puede ver también de otra manera.

En efecto, partiendo de la expresión de las aberraciones estimadas (véase la ecuación 12), es posible expresar analíticamente algunos términos.

En particular, se pueden encontrar las aberraciones por aplicación de un reconstructor R en una señal de error procedente de las imágenes de diversidad; R está entonces pre-definido y calculado de una vez por todas para el conjunto de los parámetros físicos que definen el sistema; se debe observar que, en este caso, el objeto inicialmente tenido en cuenta es un objeto medio que necesita un conocimiento *a priori* de las escenas que se van a observar.

Se observa, no obstante, que en el marco de una utilización en bucle cerrado, este objeto se puede ajustar a medida que se estabiliza el bucle.

En este caso, se puede simplificar la ecuación (12). Las deformaciones del frente de onda se expresan entonces como

$$\hat{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}, \quad (17)$$

en la que $\mathbf{I} = [\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_d]$ designa una concatenación de matrices, I es por lo tanto de tamaño $N_d N_f$, cuyos elementos \tilde{r}_i son las transformadas de Fourier de las imágenes de diversidad, R es el reconstructor, de tamaño $N_a \times N_f N_d$.

El procedimiento de estimación correspondiente, ilustrado en la figura 6 en un cuadro no limitativo con dos imágenes, se desarrolla en dos fases.

En una primera fase, el reconstructor se determina de antemano: los modelos que se asociarán con las imágenes, de tamaño $N_a \times N_f$, se calculan bajo la hipótesis de las fases débiles ϕ_s sobre el ASO por combinación 31 de las funciones de transferencia 31.1 y 31.2 obtenidas en los dos planos de diversidad. Se obtienen entonces dos matrices 31.3 y 31.4.

En una segunda fase, el sub-reconstructor 31.3 se multiplica matricialmente por la transformada de Fourier de la imagen 27; se efectúa la misma operación entre la matriz 31.4 y la imagen 26.

Las dos matrices resultantes 32 y 33 se restan a continuación de manera que se obtenga la función x, que servirá para deducir en 34 las aberraciones buscadas 40.

A continuación, las imágenes pueden servir también para ajustar el objeto utilizado en el reconstructor (dando como resultado las líneas discontinuas representadas en la figura 6).

Se ha descrito anteriormente la utilización de la linealización de los picos de la función de transferencia óptica para la búsqueda de aberraciones, una vez determinada ésta, se pueden utilizar para volver al objeto, en particular cuando este último es desconocido.

5

Ejemplo 3

Utilizando la expresión del objeto expresado por la ecuación (9) en función de las aberraciones, se puede, una vez estimadas las aberraciones, reinyectarlas en la expresión para encontrar el objeto.

10

Evidentemente, es posible afinar la búsqueda del objeto mediante una eventual operación de filtrado, la gestión de los efectos de borde, etc.

15

La figura 7 ilustra la estimación del objeto observado mediante un sistema óptico compuesto por dieciocho sub-pupilas. Esta pupila (compuesta de sub-pupilas) es muy similar a un telescopio monolítico, lo cual demuestra que el dispositivo actual se podría aplicar a un telescopio de este tipo con unas sub-pupilas hexagonales, por ejemplo.

20

Se ilustra un caso en el que el instrumento de observación se ve afectado por una perturbación de fase igual a $\lambda/10$, que resulta de una selección aleatoria sobre ocho modos de Zernike (desenfoque, dos astigmatismos, dos comas, dos comas triples, aberración esférica).

25

Se simulan dos imágenes a partir de esta hipótesis de fase sobre el instrumento y de un objeto de referencia: una imagen en el plano focal y una imagen en un plano desenfocado de 1 rad rms, con una buena relación señal a ruido.

30

A partir de estas dos imágenes, únicamente se estima la perturbación de fase sobre las sub-pupilas (en pistón-tip-tilt únicamente).

35

El objeto se reconstruye después por desconvolución de la imagen medida en plano focal, utilizando la fase estimada.

La figura 7 muestra que el objeto así estimado por simple tratamiento digital es muy similar al objeto observado, en particular que los detalles (coches en el aparcamiento por ejemplo) son mucho más nítidos que en la imagen focal sin tratamiento.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de estimación de por lo menos una deformación (10) del frente de onda de un sistema de observación (20) o de un objeto observado por dicho sistema de observación (20), que consiste en que:
- 5
- se adquiere, cerca del plano focal del sistema de observación, por lo menos una imagen de diversidad (26-28) en por lo menos un plano de diversidad, comprendiendo la imagen de diversidad una deformación de diversidad conocida; y
- 10 caracterizado por que en cada plano de diversidad:
- se determina un modelo de imagen basado en por lo menos
 - 15 - una descomposición de la transmisión pupilar de la pupila física del sistema en una pluralidad de sub-pupilas;
 - una descomposición sobre cada sub-pupila de la deformación buscada en forma de por lo menos una deformación conocida ponderada por unos coeficientes a determinar;
 - 20 - una determinación de la función de transferencia óptica del sistema (20) por autocorrelación de la transmisión pupilar de su pupila;
 - 25 - la linealización, en dicha función de transferencia óptica, de cada uno de los términos de la autocorrelación en función de los coeficientes de la deformación buscada, efectuándose la linealización cerca de la deformación de diversidad conocida;
 - el objeto observado y el ruido;
- y por que, a partir del o de los modelos de imágenes determinadas y de la o las imágenes adquiridas, se estiman la o las deformaciones buscadas o el objeto observado.
- 30
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que la o las deformaciones o el objeto a estimar minimizan un criterio de estimación cuadrática.
- 35
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las sub-pupilas son circulares o hexagonales o cuadradas.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las deformaciones se expresan en la base de Zernike.
- 40
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la deformación de diversidad es cualquiera.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que si la o las deformaciones buscadas son
- 45
- un pistón, la linealización de la función de transferencia en cada plano de diversidad es exacta;
 - cualquiera, la linealización de la función de transferencia en cada plano de diversidad es aproximada.
- 50
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que está destinado a ser utilizado en uno o varios circuitos integrados.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sistema de observación se selecciona de entre el grupo siguiente: sistema de observación óptica, microscopio electrónico, telescopio de rayos gamma, formación de imágenes acústicas.
- 55
9. Sistema embarcado que comprende unos medios adaptados para realizar un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8.
- 60
10. Dispositivo de estimación de por lo menos una deformación (10) del frente de onda de un sistema de observación (20) o de un objeto observado por dicho sistema de observación (20), comprendiendo el dispositivo
- unos medios para adquirir, cerca del plano focal del sistema de observación, por lo menos una imagen de diversidad (26-28) en por lo menos un plano de diversidad, comprendiendo la imagen de diversidad una deformación de diversidad conocida; y
- 65

caracterizado por que en cada plano de diversidad el dispositivo comprende

- unos medios para determinar un modelo de imagen basado en por lo menos

5 - una descomposición de la transmisión pupilar de la pupila física del sistema en una pluralidad de sub-pupilas;

 - una descomposición sobre cada sub-pupila de la deformación buscada en forma de por lo menos una deformación conocida ponderada por unos coeficientes a determinar;

10 - una determinación de la función de transferencia óptica del sistema (20) por autocorrelación de la transmisión pupilar de su pupila;

15 - la linealización, en dicha función de transferencia óptica, de cada uno de los términos de la autocorrelación de los coeficientes de la deformación buscada, efectuándose la linealización cerca de la deformación de diversidad conocida;

- el objeto observado y el ruido;

20 y por que a partir del o de los modelos de imágenes determinadas y de la o las imágenes adquiridas, se estiman la o las deformaciones buscadas o el objeto observado.

11. dispositivo según la reivindicación 10, caracterizado por que comprende además unos medios para comunicar la o las deformaciones buscadas a unos medios de corrección del sistema de observación.

25 12. Dispositivo según una de las reivindicaciones 10 a 11, caracterizado por que comprende además unos medios para adquirir de manera secuencial la o las imágenes de diversidad.

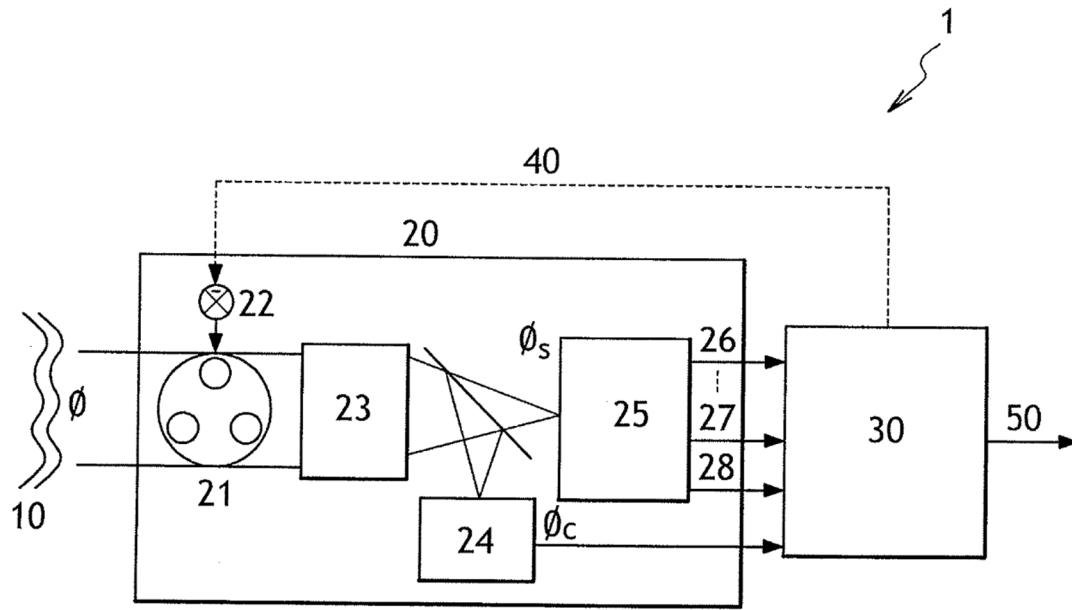


FIG.1

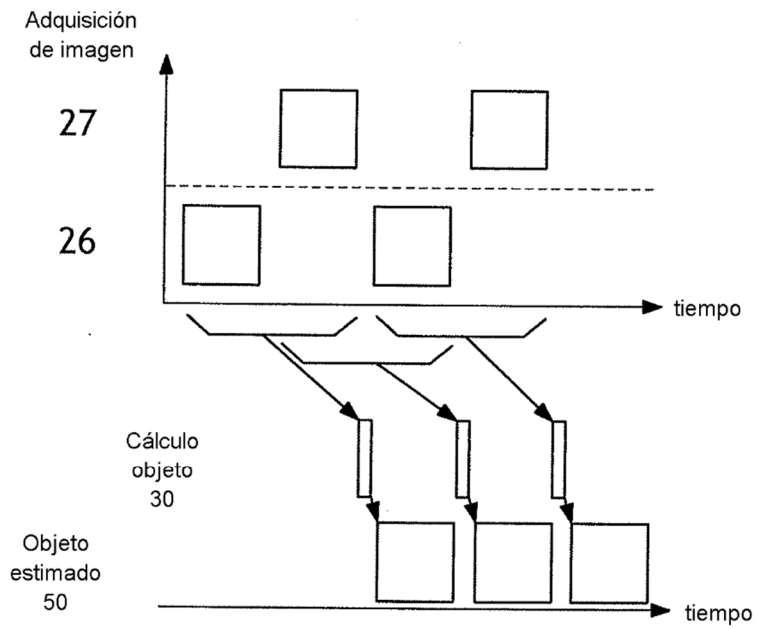


FIG.2

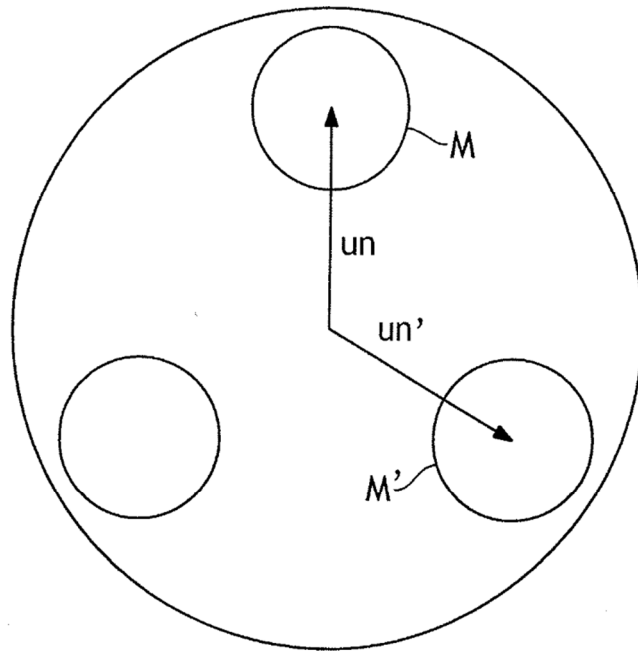


FIG.3

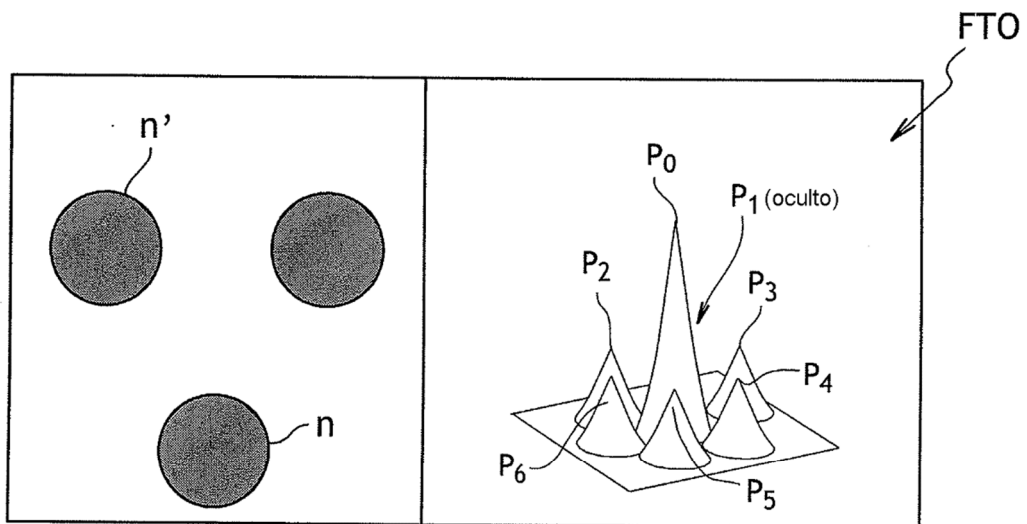


FIG.4a

FIG.4b

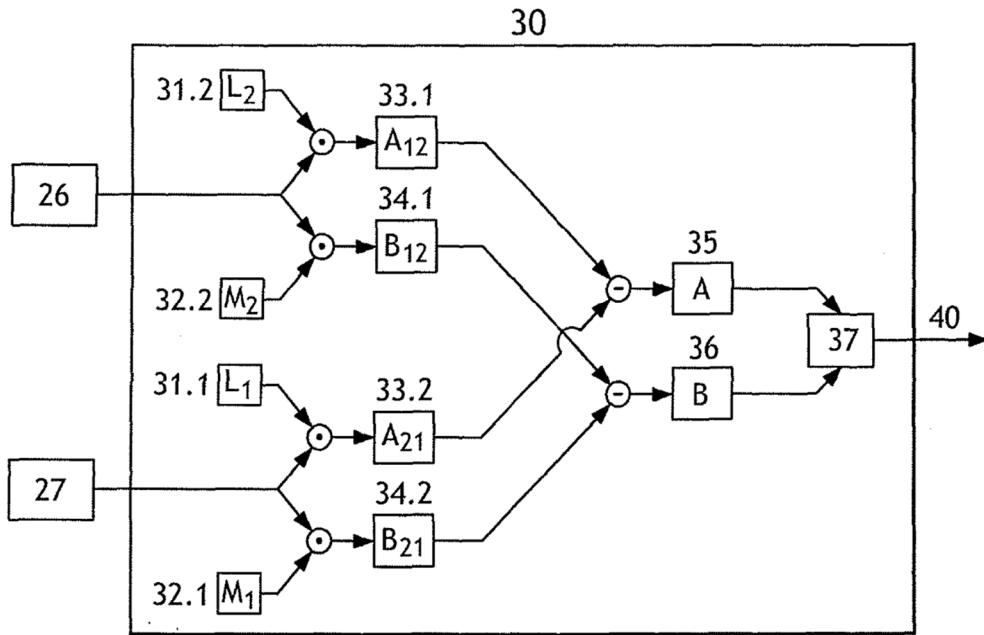


FIG.5

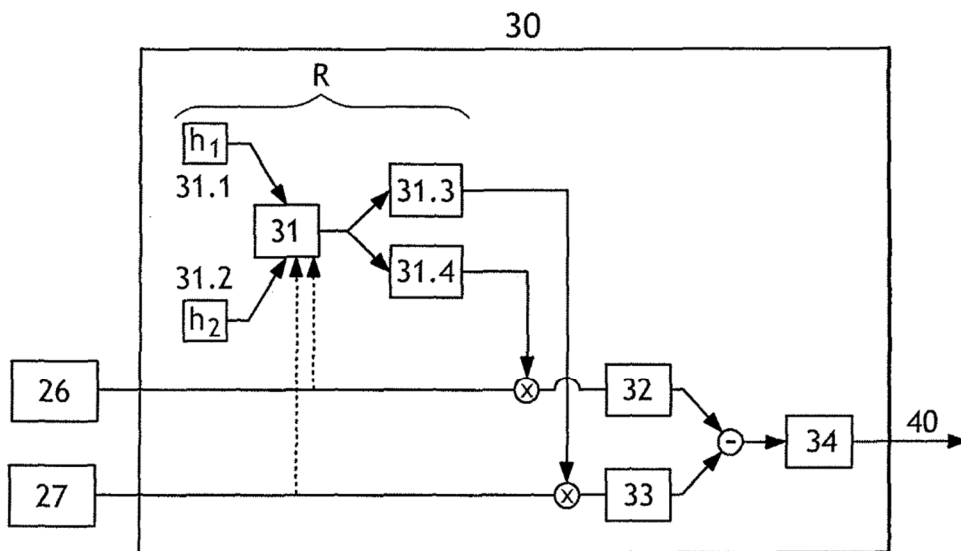


FIG.6

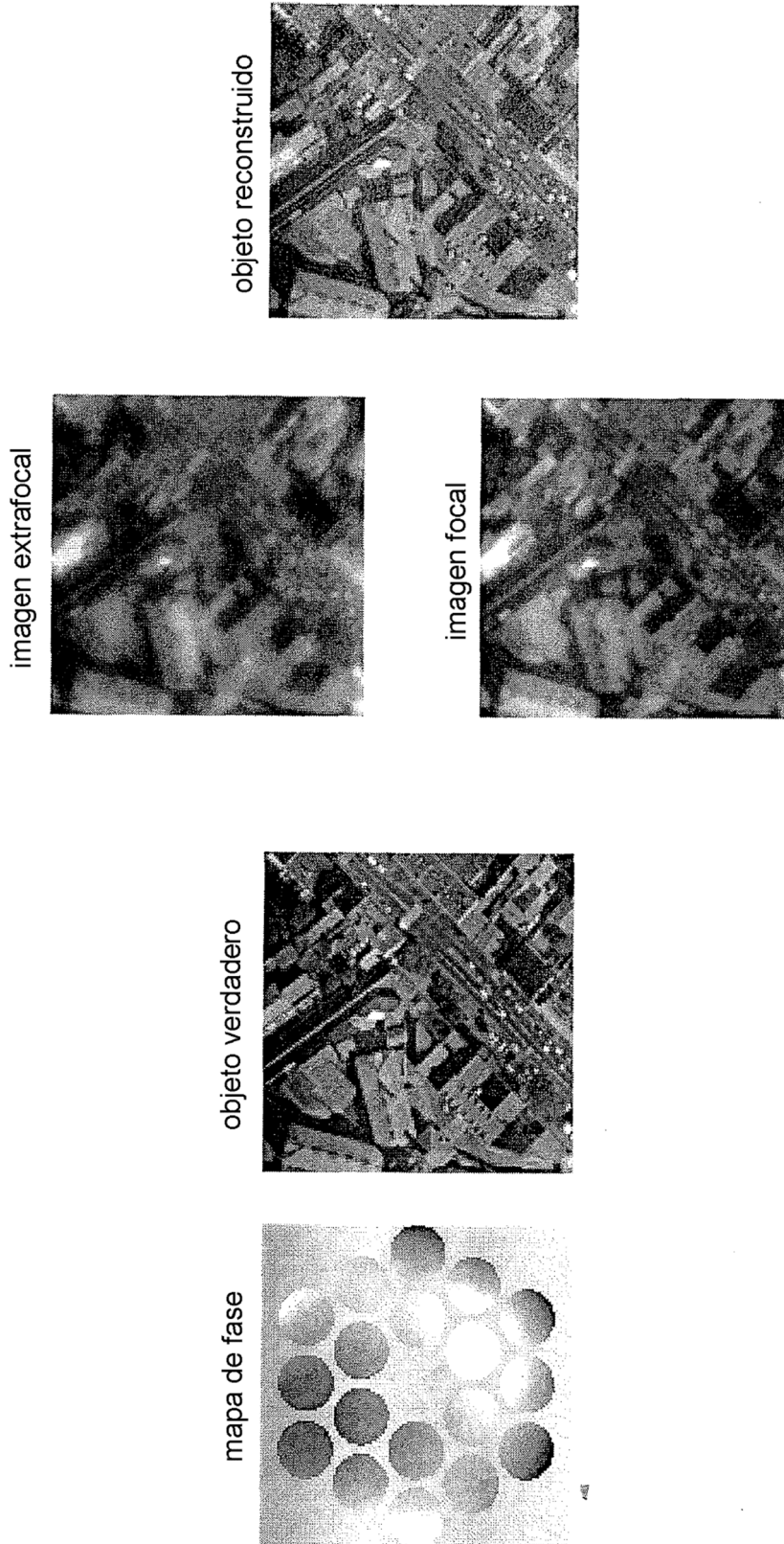


FIG.7