

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 423 581**

51 Int. Cl.:

G06T 7/00 (2006.01)

G02B 21/22 (2006.01)

G01N 15/14 (2006.01)

G01B 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.03.2009 E 09729251 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2013 EP 2279487**

54 Título: **Procedimiento de determinación de una representación tridimensional de un objeto a partir de una secuencia de imágenes en sección, producto programa de ordenador, procedimiento de análisis de un objeto y sistema de formación de imágenes correspondientes**

30 Prioridad:

27.03.2008 FR 0851984

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

23.09.2013

73 Titular/es:

**UNIVERSITÉ PARIS 13 (100.0%)
99 Avenue Jean-Baptiste Clément
93430 Villetaneuse, FR**

72 Inventor/es:

WANG, JIAPING

74 Agente/Representante:

PONTI SALES, Adelaida

ES 2 423 581 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 determinación de una representación tridimensional de un objeto a partir de una secuencia de imágenes en sección, producto programa de ordenador, procedimiento de análisis de un objeto y sistema de formación de imágenes correspondientes

5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento de determinación de una representación tridimensional de un objeto.

[0002] La invención se aplica en particular a la reconstrucción de micro objetos en los sistemas de formación de imágenes microscópicas.

10 **[0003]** El documento del estado de la técnica EP 1 413 911 A1 describe un procedimiento de determinación de una representación tridimensional de un objeto a partir de una secuencia de imágenes en sección del objeto en un plano de corte, habiendo sido cada imagen en sección tomada en un instante de toma de vista respectivo, del tipo que comprende:

- para cada imagen en sección, la determinación de la posición del objeto con respecto al plano de corte en el instante de toma de la imagen en sección,

15 - la determinación de una representación tridimensional del objeto a partir de las imágenes en sección y de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte en cada instante de toma de vista.

[0004] En este documento del estado de la técnica, el objeto es una célula de dimensión del orden de algunos micrómetros. La célula está marcada con un compuesto fluorescente y está colocada en un receptáculo de un sistema de formación de imágenes microscópico. Se crea un campo de confinamiento en el receptáculo con el fin de controlar la posición de la célula, sin que esta última se aplaste. El sistema de formación de imágenes microscópico comprende además un microscopio óptico que tiene un plano focal que forma el plano de corte. Con la finalidad de obtener la secuencia de imágenes en sección, la célula se pone en rotación a una velocidad angular constante alrededor de un eje del plano focal, y se toman unas imágenes en sección a una velocidad de entre 1 y 1000 adquisiciones por segundo.

25 **[0005]** El documento del estado de la técnica propone además determinar la representación tridimensional de la célula a partir de las técnicas de reconstrucción usuales utilizadas en tomografía. Estas técnicas usuales consisten en determinar la representación tridimensional de un objeto a partir de imágenes en sección y las posiciones del objeto con respecto al plano de corte, siendo las posiciones del objeto con respecto al plano de corte determinadas mediante el conocimiento de los ajustes de la máquina de radiografía y/o de sensores físicos que permiten conocer la posición de la máquina de radiografía.

30 **[0006]** Se conoce así del documento « A Bayesian 3D volume reconstruction for confocal micro-rotation cell imaging » (Yu Y. et al., Medical image computing and computer-assisted intervention - MICCAI 2007) un procedimiento de determinación de una representación tridimensional de un objeto.

35 **[0007]** El inventor autor de la presente invención se ha dado cuenta de que las técnicas de reconstrucciones de radiografía daban resultados mediocres, cuando se aplican al sistema de formación de imágenes microscópico precedente.

[0008] La invención tiene como objetivo suministrar un procedimiento de reconstrucción adaptado a un sistema de formación de imágenes microscópico.

40 **[0009]** Así, la invención tiene por objeto un procedimiento del tipo precitado, caracterizado por el hecho de que las posiciones del objeto con respecto al plano de corte se determinan utilizando las imágenes en sección.

[0010] Según otras características de la invención:

45 - teniendo el objeto un movimiento con respecto al plano de corte compuesto, por un lado, por un movimiento regular definido por unos parámetros de movimiento regular y, por otro lado, por una sucesión de desplazamientos de perturbaciones del objeto entre el instante de toma de una imagen en sección y el instante de toma de la siguiente, siendo los desplazamientos de perturbaciones translaciones de perturbación, de dirección y de valor variables, la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende la determinación de la sucesión de desplazamientos de perturbación utilizando las imágenes en sección,

50 - siendo el movimiento regular un movimiento de rotación definido por los parámetros de movimiento siguientes: un eje de rotación fijo y una velocidad angular constante, la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende la determinación de al menos una parte de los parámetros de movimiento regular utilizando las imágenes en sección,

- la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende la determinación de la velocidad angular en valor absoluto a partir de la determinación de un periodo de revolución de modo que dos

imágenes en sección tomadas en unos instantes respectivos separados uno del otro de un tiempo sensiblemente igual a un múltiplo, no nulo, del periodo, sean sensiblemente similares,

- 5 - la determinación del periodo comprende la determinación de un grupo inicial de periodos candidatos; la selección, entre los periodos candidatos, para cada imagen en sección, de un primer subconjunto que agrupa los periodos candidatos que tienen los niveles de similitud periódica más elevados, caracterizando el nivel de similitud periódica, para cada periodo candidato, el nivel de similitud de la imagen en sección con imágenes en sección sensiblemente periódicas, para el periodo candidato; la determinación de una ley de probabilidad de que un periodo candidato sea seleccionado, teniendo la ley de probabilidad el periodo como parámetro; la selección del periodo entre los periodos candidatos del grupo inicial, como siendo aquella que maximiza la verosimilitud según la ley de probabilidad, conociendo los periodos candidatos seleccionados,
- 10 - la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende, siendo la velocidad angular en valor absoluto conocida, para cada imagen en sección, la determinación de imagen en sección espacialmente vecinas de la imagen en sección; para cada imagen en sección, el cálculo de una proyección ortogonal de la imagen en sección sobre un plano soporte de cada imagen en sección espacialmente vecina, estando la proyección ortogonal expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación; la comparación del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina sobre la cual la proyección ha sido realizada; la determinación del eje de rotación y de la sucesión de translaciones de perturbación cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación,
- 15 - la proyección ortogonal de la imagen en sección se realiza mediante el cálculo de una transformación de afinidad de la imagen en sección, teniendo la transformación de afinidad una componente de transformación lineal y una componente de translación que son funciones de, respectivamente, por un lado, la dirección del valor de eje de rotación y la velocidad de rotación y, por otro lado, el valor de eje de rotación, la velocidad de rotación y el valor de sucesión de translaciones de perturbación,
- 20 - la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende, siendo la velocidad angular en valor absoluto conocida; para cada imagen en sección, la determinación de imágenes en sección espacialmente vecinas de la imagen en sección; para cada imagen en sección, el cálculo de una proyección ortogonal de la imagen en sección sobre un plano soporte de cada imagen en sección espacialmente vecina, estando la proyección ortogonal expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación, realizándose la proyección ortogonal mediante el cálculo de una transformación de afinidad de la imagen en sección, teniendo la transformación de afinidad una componente de transformación lineal y una componente de translación, siendo la componente de transformación lineal función de la dirección del valor de eje de rotación y la velocidad de rotación; la comparación del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina sobre la cual la proyección ha sido realizada; la determinación de la dirección del eje de rotación y de los componentes de translación, llamados de referencia, cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación,
- 25 - la determinación de una estimación de la posición del objeto con respecto al plano de corte comprende, habiendo sido determinadas la dirección del eje de rotación y los componentes de translación de referencia: la expresión de componentes de translación de transformación de afinidad en función de un valor de sucesión de translaciones de perturbación y de un valor de punto de paso del eje de rotación; la determinación de la sucesión de translaciones de perturbación y de un punto de paso del eje de rotación cuyos valores dan componentes de translación cercanos de los componentes de translación de referencia,
- 30 - la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende la determinación de la dirección del eje de rotación, y la determinación de la dirección del eje de rotación comprende la determinación de una proyección del eje de rotación sobre el plano de corte, a partir de las imágenes en sección,
- 35 - cada imagen en sección que comprende una rejilla de píxeles, idéntica para todas las imágenes en sección, el procedimiento comprende: para cada píxel de la rejilla, la determinación del histograma de los valores que toma este píxel en al menos una parte de la secuencia de imágenes en sección y del histograma de los valores que toma el punto simétrico al píxel con respecto a un valor de proyección del eje de rotación; la determinación de la proyección del eje de rotación cuyo valor da histogramas cercanos entre cada píxel y su punto simétrico,
- 40 - el procedimiento comprende: la determinación, para al menos un píxel de la rejilla, de un tiempo de simetrización, necesaria a un punto del objeto para desplazarse desde este píxel hasta el punto simétrico con respecto a la proyección del eje de rotación; la determinación de un ángulo entre el eje de rotación y su proyección sobre el plano de corte, a partir del o de los tiempo de simetrización,
- 45 - la determinación de las posiciones del objeto con respecto al plano de corte comprende, siendo la velocidad angular y el eje de rotación conocidos: para cada imagen en sección, la determinación de imagen en sección espacialmente vecinas de la imagen en sección; para cada imagen en sección, el cálculo de una proyección

ortogonal de la imagen en sección sobre un plano soporte de cada imagen en sección espacialmente vecinas, estando la proyección ortogonal expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación, realizándose la proyección ortogonal mediante el cálculo de una transformación de afinidad de la imagen en sección, teniendo la transformación de afinidad una componente de transformación lineal y una componente de translación, siendo la componente de transformación lineal función de la dirección del valor de eje de rotación y la velocidad angular de rotación; la comparación del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina sobre la cual la proyección ha sido realizada; la determinación, siendo el eje de rotación conocido, de los componentes de translación, llamados de referencia, cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación; la expresión de componentes de translación de transformación de afinidad en función de un valor de sucesión de translaciones de perturbación y de un valor de punto de paso del eje de rotación; la determinación de la sucesión de translaciones de perturbación y de un punto de paso del eje de rotación cuyos valores dan componentes de translación cercanos de los componentes de translaciones de referencia,

[0011] La invención también tiene por objeto un producto de programa de ordenador que, cuando se ejecuta en un ordenador informático, realiza un procedimiento según la invención.

[0012] La invención también tiene por objeto un procedimiento de análisis de un objeto para determinar de este una representación tridimensional, que comprende: la introducción del objeto en un sistema de formación de imágenes que definen un plano focal que forma un plano de corte; la configuración del sistema de formación de imágenes para hacer girar el objeto alrededor de un eje de rotación fijo y con una velocidad angular fija; la toma de una secuencia de imágenes en sección del objeto; la determinación de una representación tridimensional del objeto a partir de la secuencia de imágenes en sección, utilizando un procedimiento según la invención.

[0013] Según otra características de la invención:

- el procedimiento comprende: la toma de una secuencia de imágenes en sección del objeto, llamadas imágenes en sección de ajuste; la determinación del eje de rotación del objeto, a partir de las imágenes en sección de ajuste,

- el procedimiento comprende el ajuste del sistema de formación de imágenes para desplazar el plano de corte con respecto al objeto de manera que el plano de corte pase por un medio del objeto,

- el ajuste del sistema de formación de imágenes comprende la determinación de un baricentro del objeto, y el medio del objeto es la proyección del baricentro sobre el eje de rotación.

[0014] La invención también tiene por objeto un sistema de formación de imágenes caracterizado por el hecho de que comprende medios que permiten obtener imágenes en un plano focal, un receptáculo para recibir un objeto, medios para poner el objeto en movimiento, medios para recibir imágenes en sección tomadas en el plano focal, adaptados para llevar a cabo un procedimiento según la invención.

[0015] Estas características, así como otras, aparecerán con la lectura de la descripción siguiente de modos de realización preferidos de la invención. Esta descripción se hace con referencia a los dibujos adjuntos, entre los cuales:

- la figura 1 representa un sistema de formación de imágenes según la invención,

- la figura 2 representa las etapas de un procedimiento según la invención de análisis de un objeto,

- la figura 3 representa las etapas de un procedimiento, empleado en el procedimiento de análisis de la figura 2, de tratamiento de imágenes en sección del objeto,

- la figura 4 representa las etapas de determinación de parámetros del movimiento del objeto con respecto a un plano de corte,

- la figura 5 representa las etapas de determinación, según una primera variante, de un eje de rotación del objeto y de una sucesión de translaciones de perturbación que padece el objeto,

- la figura 6 ilustra la proyección ortogonal de una imagen en sección sobre un plano soporte de una imagen espacialmente vecina,

- la figura 7 representa las etapas de determinación, según una segunda variante, de un eje de rotación del objeto y de una sucesión de translaciones de perturbación que padece el objeto,

- la figura 8 representa las etapas de determinación, según una tercera variante, de un eje de rotación del objeto y de una sucesión de translaciones de perturbación que padece el objeto,

- la figura 9 ilustra un círculo que corta el plano de corte, que describe un punto del objeto alrededor del eje de rotación,

- la figura 10 representa las etapas del principio de una determinación de una representación tridimensional del objeto,
- la figura 11 representa las etapas finales, según una primera variante, de la determinación de una representación tridimensional del objeto,
- 5 - la figura 12 representa las etapas finales, según una segunda variante, de la determinación de una representación tridimensional del objeto,
- la figura 13 representa las etapas de una variante de determinación de un conjunto de puntos, para la determinación de la representación tridimensional del objeto de la figura 10,
- 10 - la figura 14 representa las etapas de una variante de selección de grupos de puntos, realizada en la determinación del conjunto de puntos de la figura 13,
- la figura 15 representa las etapas, según una tercera variante, de determinación de una representación tridimensional del objeto, y
- la figura 16 representa las etapas de un ajuste del sistema de formación de imágenes de la figura 1.

15 **[0016]** La descripción siguiente se refiere a la determinación de una representación tridimensional de una célula viva. Sin embargo, al experto en la materia no le costará transponer esta descripción a otros tipos de objetos, vivos o inertes.

[0017] Por otro lado, las relaciones matemáticas indicadas a continuación están expresadas en una referencia fija XYZ, fijada al plano de corte P (que se describirá más adelante) y cuyo plano XY se confunde con este plano de corte P .

20 **[0018]** Además, en la presente descripción, el término « valor » no significa únicamente un valor de número, sino que también puede ser un valor de vector (es decir un vector particular) o un valor de línea (es decir una línea particular), etc., según la naturaleza del objeto matemático cuyo valor se considera.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FORMACIÓN DE IMÁGENES

25 **[0019]** Con referencia a la figura 1, un sistema de formación de imágenes microscópico 10 comprende ante todo un microscopio óptico 12. El microscopio óptico 12 comprende una lente 14 que define un plano focal P . El microscopio óptico 12 comprende además una cámara 16, por ejemplo una cámara CCD que permite obtener imágenes en el plano focal P .

[0020] El sistema de formación de imágenes microscópico 10 comprende además un receptáculo 18 para recibir un objeto O de tamaño microscópico, tal como una célula, en el cual se ha introducido una materia fluorescente.

30 **[0021]** De manera general, es posible remplazar la materia fluorescente mediante cualquier marcador adaptado al objeto estudiado, y capaz de ser detectado por el sistema de formación de imágenes utilizado.

35 **[0022]** El receptáculo 18 comprende una cámara 20 destinada a contener un microsistema fluido que comprende el objeto O . La cámara 20 está situada en frente de la lente 14 del microscopio óptico 12. La cámara 20 está delimitada por un soporte 24, unas paredes laterales 26 y un cristal 28 que cubre las paredes 26 con la finalidad de que la lente pueda observar el contenido de la cámara 20. La cámara 20 define un volumen U .

[0023] Las paredes laterales comprenden unos microelectrodos 30 para crear un campo eléctrico, permitiendo este último posicionar el objeto O .

40 **[0024]** El sistema de formación de imágenes microscópico 10 comprende además un dispositivo 32 de iluminación del marcador contenido en el objeto O , de manera que cada punto o del objeto O emita una luminosidad $O(o)$. El entorno del objeto O emite al contrario una luminosidad muy reducida, incluso nula.

[0025] El sistema de formación de imágenes microscópico 10 comprende también una unidad de control 34, que actúa en particular sobre los microelectrodos 30 para poner el objeto O en movimiento, y sobre la cámara 16 para tomar una secuencia de imágenes en sección $X_0...X_m$ en el plano focal P (que forma así un plano de corte P del volumen U de la cámara 20, y en particular del objeto O), a unos instantes de tomas de vista $t_0...t_m$ respectivos.

45 **[0026]** Una referencia XYZ es solidaria del plano de corte P . Otra referencia, llamada referencia del objeto O , es además solidaria del objeto O . Esta otra referencia se escoge, preferentemente, de modo que se confunda con la referencia XYZ en el instante inicial t_0 . Por otro lado, el término «un punto del objeto » significa en lo que sigue, excepto indicación explícita, un punto en la referencia del objeto O .

50 **[0027]** Cada imagen en sección X_k se extiende sobre un plano soporte P_k solidario del objeto O , confundándose este plano soporte P_k con el plano de corte P en el momento t_k de la toma de la imagen en sección X_k .

[0028] Cada imagen en sección X_k comprende una rejilla G de píxeles s . La rejilla G es la misma para todas las imágenes en sección $X_0...X_m$. Cada píxel s registra un valor $X_k(s)$ de la luminosidad del marcador en la posición del píxel s en el volumen U de la cámara 20. En la presente descripción, este valor de luminosidad se registra de manera monocroma, en la forma de un nivel de gris.

5 **[0029]** Así, cuando un punto o del objeto O se encuentra en la posición del píxel s , en el instante t_k de toma de la imagen en sección X_k , el valor $X_k(s)$ de este píxel s es función en especial de la luminosidad $O(o)$ del punto o . Cuando ningún punto del objeto O se encuentra en la posición del píxel s , es la luminosidad del « vacío » la que se registra (de hecho, la del fluido que comprende el objeto O). Así, el fondo de las imágenes en sección $X_0...X_m$ tiene un bajo nivel de gris.

10 **[0030]** Además, el valor $X_k(s)$ de un píxel s depende también de una función de difusión del punto (« Point Spread Function » o PSF) que introduce una borrosidad. En general, la función de difusión del punto tiene una forma alargada perpendicularmente al plano de corte P .

15 **[0031]** El sistema de formación de imágenes microscópico 10 comprende por otro lado un dispositivo informático 36 de tratamiento de imagen, conectado con la unidad de control 30 para recibir las imágenes en sección $X_0...X_m$. Un programa de ordenador 38 de reconstrucción está instalado en el dispositivo informático 36. El programa de ordenador 38 está concebido para llevar a cabo un procedimiento de reconstrucción destinado a determinar una representación tridimensional V del objeto O a partir de la secuencia de imágenes en sección $X_0...X_m$. El dispositivo informático 36 es capaz de exportar la representación tridimensional V en forma de un fichero numérico y/o de representar esta representación tridimensional V sobre una pantalla 40.

20 **DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS**

[0032] Un procedimiento de análisis de un objeto O , empleado por el sistema de formación de imágenes 10 se ilustra en la figura 2. Con referencia a esta figura 2, el procedimiento de análisis de un objeto O comprende una etapa 50 de introducción del objeto O en la cámara 20, luego una etapa 52 de configuración de la unidad de control 34 con el fin de hacer girar el objeto O alrededor de un eje de rotación fijo L , con una velocidad angular fija τ . El eje L se define por un punto u_0 sobre el eje de rotación L - llamado en lo que sigue punto de paso u_0 - y una dirección a del eje de rotación L , de norma unitaria: $\|a\|=1$. El eje de rotación L no es perpendicular al plano de corte P .

25 **[0033]** El procedimiento de análisis comprende además una etapa 54 de adquisición de al menos una secuencia de imágenes en sección $X_0...X_m$ a unos instantes de tomas de vista $t_0...t_m$ respectivos, y una etapa 56 de tratamiento de las imágenes en sección $X_0...X_m$ por el programa de ordenador 38.

30 **[0034]** En la práctica, el eje de rotación L nunca es exactamente aquel ajustado por la unidad de control 34. Por lo tanto la invención propone determinar el eje de rotación L a partir de las imágenes en sección $X_0...X_m$, luego determinar una representación tridimensional V a partir del eje de rotación L determinado, antes que a partir del eje de rotación ajustado a partir del ajuste de la unidad de control 34.

35 **[0035]** Además, en la práctica, el movimiento del objeto O nunca perfectamente rotativo. El error de movimiento con respecto a la rotación de eje fijo se representa mediante una sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$, siendo cada translación de perturbación padecida por el objeto O entre dos imágenes en sección sucesivas X_{k-1}, X_k respectivas. Las translaciones de perturbación $T_1...T_m$ son de dirección y de valor variables.

[0036] Así, la posición de un punto o del objeto O en un instante de toma de vista t_k , partiendo de la posición u del punto o en el instante de toma de vista t_{k-1} precedente, es:

$$R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_{k-1})}(u - u_0) + u_0 + T_k,$$

40 donde

$$R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_{k-1})}$$

es la matriz de rotación de ángulo $\tau \cdot (t_k - t_{k-1})$ alrededor del eje de dirección a que pasa por el origen de la referencia

XYZ. Se destacará que la matriz de rotación $R_{\bar{a}, \alpha}$ de ángulo α alrededor de un eje de dirección a que pasa por el origen se determina, según la fórmula de Rodrigues, por:

$$R_{\vec{a},\alpha} = I + \sin \alpha [\vec{a}]_{\mathbf{x}} + (1 - \cos \alpha) [\vec{a}]_{\mathbf{x}}^2 ,$$

$$[\vec{a}]_{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

donde I es la matriz identidad 3-por-3, y

con $a = (a_1, a_2, a_3)$.

5 **[0037]** Se destacará también que la translación de perturbación T_k no depende de la posición de u_0 sobre el eje de rotación L .

Tratamiento de las imágenes en sección adquiridas

10 **[0038]** Con referencia a la figura 3, la etapa de tratamiento 56 realizada por el programa de ordenador 38 comprende ante todo una etapa 100 de extensión de cada imagen en sección $X_0...X_m$, en el transcurso de la cual se calculan valores de puntos entre los píxeles s , así como valores de puntos fuera de la rejilla G . Por ejemplo, los valores de los puntos entre los píxeles s se calculan por interpolación o por alisado a partir de los valores de los píxeles s de la rejilla G , mientras que los valores de los puntos fuera de la rejilla G se ponen a un nivel reducido de gris, por ejemplo 0. En lo que sigue, un punto cualquiera de una imagen en sección, píxel cuyo valor se mide o punto cuyo valor se calcula, se indicará x , mientras que un píxel propiamente dicho de una imagen en sección se indicará s . El valor de un punto x se indicará $X_k(x)$, mientras que el valor de un píxel s se indicará $X_k(s)$.

15 **[0039]** La etapa 56 realizada por el programa de ordenador 38 comprende además una etapa 200 de determinación de los parámetros del movimiento del objeto O con respecto al plano de corte P . En el transcurso de esta etapa de determinación de los parámetros del movimiento 200, se determinan los parámetros de movimiento regular (velocidad angular τ , el eje de rotación L), así como los parámetros de movimiento de perturbación (sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$).

20 **[0040]** Los parámetros de movimiento (velocidad angular τ , el eje de rotación L y sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$) determinan la posición del objeto O en cada instante de toma t_k de una imagen en sección X_k : la posición en el instante de toma t_k de un punto o que se sitúa en la posición u en el instante inicial t_0 se determina mediante:

$$R_{\vec{a},\tau(t_k-t_0)}(u - u_0) + u_0 + \bar{T}_k ,$$

25 donde

$$\bar{T}_k = R_{\vec{a},\tau(t_k-t_1)}T_1 + R_{\vec{a},\tau(t_k-t_2)}T_2 + \dots + R_{\vec{a},\tau(t_k-t_{k-1})}T_{k-1} + T_k ,$$

es la translación acumulada desde el instante inicial t_0 hasta el instante t_k de toma de la imagen en sección X_k , con $T_0=0$.

30 **[0041]** La posición del objeto O en cada instante de toma t_k de imagen en sección X_k determina la posición del plano de corte P en el instante de toma t_k en una referencia cualquiera solidaria del objeto O (y vice-versa): la posición en la referencia del objeto O escogida (que se confunde con la referencia fija XYZ en el instante de toma inicial t_0) de un píxel s del plano de corte P en el instante de toma t_k es:

$$R_{\vec{a},\tau(t_k-t_0)}^t(\pi_3 s - u_0 - \bar{T}_k) + u_0$$

con

$$R_{\vec{a}, \tau(t_k - t_0)}^t$$

la matriz transpuesta de

$$R_{\vec{a}, \tau(t_k - t_0)}^t, \pi_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \pi_3 X$$

5 es la posición en la referencia tridimensional XYZ de un punto x de una imagen en sección, confundiendo el plano soporte de la imagen en sección con el plano XY. La posición del plano de corte P en cualquier otra referencia solidaria del objeto O en cada instante de toma t_k se deduce de la posición del plano de corte P en la referencia del objeto O escogida en el instante de toma t_k y de la relación entre la referencia del objeto escogido y esta otra referencia.

10 **[0042]** En la descripción siguiente, el movimiento del objeto O con respecto al plano de corte P se expresa en la referencia XYZ solidaria del plano de corte P . Por supuesto, el movimiento del objeto O con respecto al plano de corte P podría expresarse en otra referencia, que no sería obligatoriamente solidaria del plano de corte. En este caso, la determinación del movimiento del objeto O con respecto al plano de corte P comprendería además la determinación del movimiento del plano de corte P con respecto a esta otra referencia.

15 **[0043]** La etapa 56 realizada por el programa de ordenador 38 comprende además una etapa 400 de determinación de una representación tridimensional V del objeto O , a partir de las imágenes en sección $X_0 \dots X_m$ y de los parámetros de movimiento $\tau, L, T_1 \dots T_m$.

Determinación de la velocidad angular en valor absoluto

20 **[0044]** El signo de la velocidad angular τ indica el sentido de la rotación del movimiento. El signo de la velocidad angular $|\tau|$ es positivo si la rotación se hace en el sentido positivo con respecto a la dirección a , y negativo si la rotación se hace en el sentido negativo con respecto a la dirección a . El signo de la velocidad angular τ se conoce, por ejemplo, a partir del ajuste del sistema de formación de imágenes 10, una vez que la dirección a del eje de rotación se ha escogido.

25 **[0045]** Si el signo de la velocidad angular τ no se conoce, puede escogerse arbitrariamente: en este caso, la representación tridimensional V del objeto O será en el peor caso la representación tridimensional V del espejo del objeto O .

[0046] Con referencia a la figura 4, la etapa 200 de determinación de los parámetros del movimiento comprende una etapa 210 de determinación de la velocidad angular en valor absoluto $|\tau|$.

30 **[0047]** Esta etapa 210 comprende ante todo una etapa 212 de determinación de un periodo $p > 0$ tal que cada par de imágenes en sección $X_k, X_{k'}$ tomadas en unos instantes respectivos $t_k, t_{k'}$, separados uno del otro de un tiempo sensiblemente igual a un múltiplo (no nulo) del periodo p , sean sensiblemente similares. Este periodo p es así el periodo de revolución del objeto O .

[0048] Más concretamente, la etapa 212 de determinación del periodo de revolución p comprende una etapa 214 de determinación de un grupo inicial de periodos candidatos $p_1 \dots p_n$ positivos, y una etapa 216 de selección del periodo de revolución p entre los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$ del grupo inicial.

35 **[0049]** En el ejemplo descrito, la etapa de determinación 214 de los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$ consiste en escoger los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$. Preferentemente, los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$ se escogen uniformemente espaciados.

Determinación simple del periodo

40 **[0050]** La etapa 216 de selección del periodo de revolución p comprende, en una variante simple, la determinación del mejor periodo entre los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$, maximizando la verosimilitud según un modelo probabilista escogido.

Determinación evolucionada del periodo

[0051] Sin embargo, para mejorar la fiabilidad de la determinación del periodo de revolución p , se realizan una o varias selecciones previas sobre los periodos candidatos $p_1...p_n$, considerando el modelo probabilista esta o estas selecciones.

5 **[0052]** Con referencia a la figura 4, la etapa 216 de selección del periodo de revolución p comprende dos etapas 218, 220 de selección, con la finalidad de obtener, por un lado, para cada imagen en sección X_k , un primer subconjunto respectivo $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ de periodos candidatos y, por otro lado, para todas las imágenes en secciones $X_0...X_m$, un segundo subconjunto $p_{j(1)}...p_{j(l)}$ de periodos candidatos.

Selección de los primeros subconjuntos

10 **[0053]** La primera etapa 218 de selección de los primeros subconjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ comprende, para cada imagen en sección X_k y para cada periodo candidato p_j , una etapa de determinación 222 de imágenes en sección sensiblemente periódicas $X_{k'}$ (según el periodo candidato p_j) a la imagen en sección X_k .

15 **[0054]** La etapa 222 de determinación de las imágenes en sección sensiblemente periódicas $X_{k'}$ comprende una etapa 224 de determinación de las imágenes en secciones $X_{k'}$ tomadas en unos instantes de toma de vista $t_{k'}$ separados del instante t_k de toma de la imagen en sección X_k por un tiempo cercano de un múltiplo (no nulo) del periodo candidato p_j . « Cercano » significa que la diferencia entre el tiempo cercano y el múltiplo (no nulo) del periodo candidato p_j , está comprendido en un intervalo de tiempo J que comprende 0. Preferentemente, el intervalo de tiempo J está centrado en 0. Por ejemplo, $J = [-\zeta, \zeta]$ con ζ pequeño con respecto a cada periodo candidato p_j , con $\zeta p_j/3$ para el conjunto de los periodos candidatos p_j . Como variante, ζ varía en función del periodo candidato p_j escogiendo por ejemplo $\zeta = p_j/10$ para cada periodo candidato p_j .

20

[0055] La primera etapa 218 de selección de los primeros subconjuntos $\{p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}\}$ comprende además una etapa 226 de recentrado de cada imagen en sección sensiblemente periódica $X_{k'}$ con respecto a la imagen en sección X_k .

25 **[0056]** La etapa de recentrado 226 comprende ante todo una etapa de selección 228 de píxeles luminosos, en la imagen en sección X_k y en la imagen en sección sensiblemente periódica $X_{k'}$. Preferentemente, los píxeles seleccionados son aquellos cuyo nivel de gris es superior a un umbral predeterminado α , siendo este umbral por ejemplo el q -cuantil de nivel de gris de las imágenes en secciones $X_0...X_m$ (lo que significa que la proporción de los píxeles de las imágenes en secciones $X_0...X_m$ que tienen un nivel de gris inferior o igual a α es sensiblemente igual a q , y el de los píxeles que tienen un nivel de gris superior a α es sensiblemente igual a $1-q$), con q estando por ejemplo entre 60% y 95%.

30

[0057] La etapa de recentrado 226 comprende además una etapa 230 de cálculo, por un lado, de un primer centro $d(X_k)$ de los puntos luminosos seleccionados en la imagen en sección X_k y, por otro lado, el cálculo de un segundo centro $d(X_{k'})$ de los puntos luminosos seleccionados en la imagen en sección $X_{k'}$.

[0058] El centro de una imagen X (X_k o $X_{k'}$) se determina mediante:

$$d(X) = \frac{\sum_s 1_{X(s) > \alpha} s}{\sum_s 1_{X(s) > \alpha}}$$

35 donde $1_{A > B}$ es la función indicadora: $1_{A > B} = 1$ si $A > B$, y $1_{A > B} = 0$ en caso contrario. La etapa de recentrado 226 comprende además la determinación 232 de una separación $d_{k,k'}$ entre los centros de los puntos luminosos de la imagen en sección X_k y de la imagen en sección sensiblemente periódica $X_{k'}$: $d_{k,k'} = d(X_k) - d(X_{k'})$.

40 **[0059]** La etapa de recentrado 226 comprende además una etapa 234 de translación de la imagen en sección sensiblemente periódica $X_{k'}$ de la separación $d_{k,k'}$ entre los centros, con la finalidad de obtener una imagen en sección sensiblemente periódica centrada, indicada $Trans(X_{k'}, d_{k,k'})$. La imagen en sección sensiblemente periódica centrada $Trans(X_{k'}, d_{k,k'})$ se calcula, para cada píxel s , mediante:

$$Trans(X_{k'}, d_{k,k'})(s) = X_{k'}(s - d_{k,k'}) .$$

[0060] La primera etapa 218 de selección de los primeros subconjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ comprende además una etapa 236 de determinación de una distancia $T(k,k')$ entre la imagen en sección X_k y cada imagen en sección sensiblemente periódica centrada $Trans(X_{k'}, d_{k,k'})$. Preferentemente, la distancia $T(k,k')$ se determina mediante la relación siguiente:

$$\forall 0 \leq k, k' \leq m, T(k, k') = \chi(X_k, Trans(X_{k'}, d_{k,k'})),$$

con χ una función distancia, $\chi(X, Y)$ mide la diferencia entre dos imágenes X y Y . La función distancia χ es por ejemplo una distancia cuadrática de los niveles de gris de los píxeles entre las dos imágenes, determinada por:

$$\chi(X, Y) = \sum_s (X(s) - Y(s))^2 .$$

[0061] La primera etapa 218 de selección de los primeros subconjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ comprende además una etapa 238 de determinación de un nivel de similitud periódica $sim(X_k, p_j)$ de la imagen en sección X_k a partir de las distancias $T(k,k')$.

[0062] El nivel de similitud periódica $sim(X_k, p_j)$ caracteriza el nivel de similitud de la imagen en sección X_k con las imágenes en sección sensiblemente periódicas $X_{k'}$, para el periodo candidato p_j . Preferentemente, la etapa 238 de determinación de un nivel de similitud periódica $sim(X_k, p_j)$ comprende una etapa de cálculo de la inversa de la similitud mediante la relación siguiente:

$$sim^{-1}(X_k, p_j) = \begin{cases} \frac{\sum_{r \neq 0} v(k, j, r) / \sum_{r \neq 0} h(k, j, r)}{\infty} & \text{si } \sum_{r \neq 0} h(k, j, r) > 0 \\ \text{sinon} & \end{cases} .$$

con:

$$v(k, j, r) = \sum_{i: -\zeta \leq t_i - rp_j \leq \zeta} w(t_i - rp_j) T(k, i),$$

$$h(k, j, r) = \sum_{i: -\zeta \leq t_i - rp_j \leq \zeta} w(t_i - rp_j),$$

donde r es un número entero no nulo, ζ se define de la misma manera que para la etapa 224 de determinación de las imágenes en sección sensiblemente periódicas, y w es una función de ponderación positiva definida sobre el intervalo $J = [-\zeta, \zeta]$. Preferentemente, w es simétrica con respecto a 0 ($w(t) = w(-t)$), y los valores elevados de w se concentran alrededor de 0. Por ejemplo $w(t) = \exp(-ct^2)$ con c una constante positiva. La función w permite disminuir la influencia de las imágenes en sección sensiblemente periódicas $X_{k'}$ que se alejan del múltiplo del periodo candidato p_j .

[0063] La primera etapa 218 de selección de los primeros subconjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ comprende además una etapa 240 de selección, entre los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$, para cada imagen en sección X_k , de un primer subconjunto $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ que agrupa los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$ que tienen los niveles de similitud más elevados (es decir los valores menores de $sim^{-1}(X_k, p_j)$). Preferentemente, se selecciona un número predeterminado e de periodos candidatos. Preferentemente también, este número e se escoge entre 1 y 15.

Selección del segundo subconjunto

[0064] La segunda etapa 220 de selección del segundo subconjunto $p_{j(1)}...p_{j(l)}$ de periodos candidatos comprende, para cada periodo candidato p_j , una etapa 242 de cálculo de un número de apariciones $S(p_j)$ del periodo candidato p_j , correspondiente al número de primeros subconjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$ en los cuales el periodo candidato p_j aparece.

5 **[0065]** Los valores del número de apariciones S para los periodos candidatos $p_1...p_n$ vienen dados por ejemplo mediante la relación:

$$\forall 1 \leq j \leq n, S(p_j) = \sum_{k=0}^m 1_{p_j \in \{p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}\}},$$

donde $1_{A \in B}$ es la función indicadora: $1_{A \in B} = 1$ si $A \in B$, y $1_{A \in B} = 0$ en caso contrario.

10 **[0066]** La segunda etapa 220 de selección del segundo subconjunto $p_{j(1)}...p_{j(l)}$ de periodo candidato comprende además, para cada periodo candidato p_j , una etapa 244 de cálculo de una dispersión \mathfrak{S} de los valores del número de aparición S , alrededor de cada múltiplo (superior o igual a 1) del periodo candidato p_j . La dispersión \mathfrak{S} para un periodo candidato p_j indica si unos valores elevados del número de aparición S Están concentrados (dispersión reducida) o dispersados (dispersión elevada) alrededor de cada múltiplo (superior o igual a 1) del periodo candidato p_j .

15 **[0067]** Preferentemente, la dispersión \mathfrak{S} de un periodo candidato p_j se calcula de tal manera que, más se aleja otro periodo candidato p_j del múltiplo más cercano (superior o igual a 1) del periodo candidato p_j , más contribuye el valor del número de aparición S de este otro periodo candidato p_j a la dispersión.

[0068] Preferentemente, la dispersión \mathfrak{S} del periodo candidato p_j se determina mediante la relación:

$$\forall 1 \leq j \leq n, \mathfrak{S}(p_j) = \sum_{i=1}^n \frac{|[\frac{P_i}{P_j}]p_j - P_i|}{P_j} S(p_i),$$

20 donde $[x]$ es el entero más cercano de x .

[0069] La segunda etapa 220 de selección del segundo subconjunto $p_{j(1)}...p_{j(l)}$ de periodos candidatos comprende además una etapa 246 de selección, entre los periodos candidatos p_j , del segundo subconjunto $p_{j(1)}...p_{j(1)}$ de los periodos candidatos que tienen las dispersiones \mathfrak{S} menores. Preferentemente, se selecciona un número predeterminado l de periodos candidatos. Preferentemente también, este número l se escoge entre 4 y 40.

25 *Selección del periodo a partir de los primeros subconjuntos, del segundo subconjunto, y de una ley de probabilidad*

[0070] La selección 216 del periodo de revolución p comprende además una etapa 248 de determinación de una ley de probabilidad P_p que describe la probabilidad de que se escoja un periodo p_j , en el transcurso de la etapa 218, en al menos uno de los primeros conjuntos $p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$. La ley de probabilidad P_p se define con el periodo de revolución p como parámetro.

30 **[0071]** La selección 216 del periodo de revolución p comprende además una etapa 249 de cálculo de un histograma h de los periodos candidatos seleccionados en la etapa 218. Se ha notado que los grandes valores del histograma h están en general concentrados alrededor del verdadero valor del periodo de revolución p y de los múltiplos del verdadero valor del periodo de revolución p .

35 **[0072]** Preferentemente, se considera que las selecciones para obtener los periodos candidatos en la etapa 218 son aproximadamente independientes, y que la selección de cada uno de los periodos candidatos en la etapa 218 se realiza de manera aleatoria según una ley de probabilidad P_p .

[0073] Para ello, la ley de probabilidad P_p , que tiene como parámetro el periodo de revolución p , es tal que la forma de la función de probabilidad P_p pueda « adoptar la forma » de la del histograma h con un error de un factor de dilatación, haciendo variar el valor del parámetro p .

40 **[0074]** Más concretamente, se considera que cada periodo p_j obtenido en la etapa 218 se selecciona ya sea de manera aleatoria, con una reducida probabilidad β , entre todos los periodos candidatos $p_1...p_n$ según la ley uniforme, o bien con la probabilidad $1 - \beta$ mediante una elección alternativa que consiste en escoger un periodo alrededor de un múltiplo (superior o igual a 1) del periodo de revolución p . Esta elección alternativa se hace escogiendo primero

un múltiplo ip (i un número entero y $i \geq 1$) con una probabilidad b_i y a continuación escogiendo p_j alrededor de ip (estando ip ya escogido) con la probabilidad $v_{ip}(p_j)$.

[0075] En este caso, la ley de probabilidad P_p se define mediante la relación:

$$\forall 1 \leq j \leq n, P_p(p_j) = \frac{\beta}{n} + (1 - \beta) \sum_{i=1}^{l(p)} b_i v_{ip}(p_j),$$

5 donde, $l(p)$ el número de los múltiplos de p .

[0076] La ley P_p es una mezcla de la ley uniforme sobre el conjunto de los periodos candidatos $p_1 \dots p_n$, y de las leyes v_{ip} con $1 \leq i \leq l(p)$.

[0077] La probabilidad $v_{ip}(p_j)$ es preferentemente la translación de una función de soporte v del valor ip : $v_{ip}(x) = v(x - ip)$. Preferentemente, se escoge la función de soporte v finita y positiva para definir b_i y v_{ip} . Preferentemente también, v es simétrica alrededor de 0 (es decir que $v(-x) = v(x)$) y centrada en 0. Por ejemplo, se tomará $v(x) \propto e^{-dx^2} 1_{|x| \leq \delta}$, o bien $v(x) \propto (\delta - |x|) 1_{|x| \leq \delta}$ por d y δ constantes positivas determinadas.

[0078] Preferentemente $l(p) = \max\{i \in \mathbb{N}^* : \{p_1, \dots, p_n\} \cap \text{supp}(v_{ip}) \neq \emptyset\}$. Con $\text{supp}(v_{ip}) = \{x : v_{ip}(x) \neq 0\}$, y $v_{ip}(p_j) = v_{ip}(p_j) / c_i$,

$$b_i = \frac{c_i}{\sum_{k=1}^{l(p)} c_k},$$

con

$$c_i = \sum_{k=1}^n v_{ip}(p_k).$$

15

En la práctica β se escoge entre 0 y 25%.

[0079] La selección 216 del periodo de revolución p comprende además una etapa 250 de determinación del periodo de revolución p , como siendo el periodo del segundo subconjunto de periodos candidatos $p_{j(1)} \dots p_{j(l)}$ que maximiza la verosimilitud $Vrais(p)$ (o, de manera equivalente, la log-verosimilitud $\log Vrais(p)$) asociada a la ley de probabilidad P_p precedente, estando determinados los primeros subconjuntos de periodos seleccionados $p_{j(k,1)} \dots p_{j(k,e)}$, $0 \leq k \leq m$. La log-verosimilitud se determina mediante:

20

$$\log Vrais(p) = \sum_{j=1}^n S(p_j) \log P_p(p_j).$$

[0080] Como variante, la etapa 212 de determinación del periodo de revolución p no comprende la etapa 220 de determinación del segundo subconjunto, y, en la etapa 250, el periodo de revolución p se determina como siendo el periodo del conjunto de periodos candidatos $p_1 \dots p_n$, que maximiza la verosimilitud $Vrais(p)$ precedente.

25

[0081] La etapa 210 de determinación de la velocidad angular en valor absoluto $|\tau|$ comprende entonces una etapa 252 de cálculo de la velocidad angular en valor absoluto $|\tau|$ a partir del periodo de revolución p :

$$|\tau| = 2\pi p.$$

[0082] Una vez escogida la dirección a del eje de rotación, la velocidad angular τ se determina a partir del sentido conocido (o supuesto) de rotación con respecto a la dirección a del eje de rotación, mediante la relación siguiente:

30

$$\tau = \begin{cases} 2\pi p & \text{para rotaciones positivas} \\ -2\pi p & \text{para rotaciones negativas} \end{cases}$$

5 **[0083]** La etapa 200 de determinación de los parámetros del movimiento comprende además una etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$.

Primera variante para determinar el eje de rotación y la sucesión de translaciones de perturbación

[0084] La figura 5 ilustra una primera variante de la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$.

10 **[0085]** La etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ se realiza determinando un eje de rotación L y una sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ tales que el valor $X_k(s)$ de cada píxel s de cada imagen en sección X_k , sea sensiblemente igual, para cada imagen en sección espacialmente vecinas X_k (es decir cuyo plano soporte P_k es espacialmente vecino del plano soporte P_k de la imagen en sección X_k), al valor $X_k(x')$ de un punto x' « cercano » de este píxel s , sobre la imagen en sección espacialmente vecina X_k . El punto más cercano x' se determina según un criterio de proximidad determinado.

[0086] Más concretamente, la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende una etapa 304 de determinación, para cada imagen en sección X_k de las imágenes en sección espacialmente vecinas X_k de esta imagen en sección X_k .

20 **[0087]** Una imagen en sección X_k es espacialmente vecina de la imagen en sección X_k cuando el ángulo que separa sus planos soporte respectivos P_k, P_k , es inferior a un valor predeterminado Δ_1 . El ángulo se determina preferentemente a partir de la velocidad angular en valor absoluto $|\tau|$ y los instantes t_k, t_k de toma de las dos imágenes en sección X_k, X_k . Este valor predeterminado Δ_1 se toma preferentemente inferior o igual a 12 grados. Para una imagen en sección X_k , las imágenes en secciones espacialmente vecinas X_k son por lo tanto las imágenes en sección que verifican:

25 existe un entero q tal que $|\tau|(t_k - t_k) = 2\pi q + r$, con $|r| \leq \Delta_1$.

[0088] La condición precedente sobre el ángulo que separa las imágenes en sección X_k y X_k es equivalente a una condición sobre el intervalo de tiempo que separa las tomas de las dos imágenes en sección.

[0089] La etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende además una etapa 306 de elección de un criterio de proximidad.

30 **[0090]** Con referencia a la figura 6, preferentemente, este criterio de proximidad es que el punto x' de una imagen en sección espacialmente vecina X_k , el más cercano de un píxel s de la imagen en sección X_k , es la posición $Proj_{k,k}(S) = x'$ de la proyección ortogonal o' de un punto o del objeto O sobre el plano soporte P_k de la imagen en sección X_k , situado sobre el píxel s de la imagen en sección X_k , sobre el plano soporte P_k de la imagen espacialmente vecina X_k .

35 **[0091]** Esta elección de este criterio de proximidad está especialmente adaptado en el caso de una función de difusión del punto que tiene una forma alargada perpendicularmente al plano de corte P .

[0092] Así, volviendo a la figura 5, la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende además una etapa 308 de cálculo de la proyección ortogonal $F_{k,k}(X_k)$ de la imagen en sección X_k sobre el plano soporte P_k de cada imagen en sección espacialmente vecina X_k de la imagen en sección X_k .

40 **[0093]** Preferentemente, la etapa 308 de cálculo de la proyección ortogonal $F_{k,k}(X_k)$ se realiza mediante el cálculo de una transformación de afinidad $Aff(Q_{k,k}, v_{k,k}, X_k)$ de la imagen en sección X_k , teniendo la transformación de afinidad $Aff(Q_{k,k}, v_{k,k}, X_k)$ una componente de transformación lineal $Q_{k,k}(a, \tau)$ y una componente de translación $v_{k,k}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$ funciones de, respectivamente, por un lado, la dirección a del valor de eje de rotación y la velocidad de rotación τ y, por otro lado, el valor de eje de rotación L , la velocidad de rotación $|\tau|$ y el valor de sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$. Así:

$$F_{k,k}(X) = Aff(Q_{k,k}(\bar{a}, \tau), v_{k,k}(u_0, \bar{a}, \tau, T_1 \dots T_m), X),$$

con $Aff(Q, v, X)$ la transformada de afinidad de X definida por:

$$\forall x, Aff(Q, v, X)(x) = X(Q^{-1}(x - v))$$

con Q una matriz 2x2 invertible y v un vector de translación, y

$$Q_{i,j}(\bar{a}, \tau) = \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_j - t_i)} \pi_3,$$

$$v_{i,j}(u_0, \bar{a}, \tau, T_1 \dots T_m) = (\pi_2 - \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_j - t_i)})u_0 + \pi_2 \bar{T}_j - \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_j - t_i)} \bar{T}_i,$$

5 donde

$$\pi_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

es la proyección sobre el plano XY,

$$\pi_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

10 $\pi_3 x$ es la posición en la referencia tridimensional XYZ de un punto x de una imagen en sección, confundiendo el plano soporte de la imagen en sección con el plano XY, la translación acumulada desde el instante inicial t_0 hasta el instante t_k de toma de la imagen en sección X_k con $T_0 = 0$, y se destaca que para cada posible dirección a del eje de rotación, el signo de la velocidad angular τ está determinado por el sentido conocido (o supuesto) de rotación con respecto a la dirección a del eje de rotación, por ejemplo a partir del ajuste del sistema de formación de imágenes 10, mediante la relación siguiente:

15
$$\tau = \begin{cases} |\tau| & \text{para rotaciones positivas} \\ -|\tau| & \text{para rotaciones negativas} \end{cases}$$

(si el sentido de rotación se escoge arbitrariamente:

20 en este caso, la representación tridimensional V del objeto O será en el peor de los casos la representación tridimensional V del espejo del objeto O).

[0094] La etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende además una etapa 310 de comparación de los valores $X_k(s)$ de los píxeles s de cada imagen en sección X_k con los valores $X_k(x')$ de los puntos x' más cercanos de las imágenes en sección espacialmente vecinas $X_{k'}$. Preferentemente, la etapa 310 de comparación se realiza mediante el cálculo de una distancia $\chi(Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k), X_{k'})$ entre la transformada de afinidad $Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$ de la imagen en sección X_k y la imagen en sección vecina $X_{k'}$.

[0095] La etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende además una etapa 312 de determinación de un eje de rotación L y de una sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ cuyos valores minimizan una función de coste E que comprende una primera parte función de las distancias calculadas, de manera que la reducción de las distancias calculadas causa la reducción de la función de coste E .

[0096] Preferentemente, la función de coste E comprende también una segunda parte que depende, para una sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$, de la amplitud de las translaciones de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$. Esta segunda parte comprende así una función de regularización Reg , que da un valor reducido cuando las translaciones de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ tienen una

amplitud reducida, y da un valor elevado en el caso contrario. La función de regularización *Reg* es preferentemente una norma cuadrática, por ejemplo determinada mediante la relación:

$$Reg(T_1 \dots T_m) = \|T\|_M^2 \equiv T' M T,$$

5 con *M* una matriz simétrica y definida positiva, y $T=T_1 \dots T_m$ se escribe en la forma de un vector columna con las translaciones T_k seguidas unas de otras. Por ejemplo, $M=I_{3m}$, la matriz identidad $3m \times 3m$.

[0097] Preferentemente, la función de coste *E* se determina mediante la relación siguiente:

$$E(\bar{a}, x_0, T_1 \dots T_m) = \sum_k \sum_{k' \in N_k} \chi(F_{k,k'}(X_k), X_{k'}) + \lambda Reg(T_1 \dots T_m),$$

10 con N_k el conjunto de los índices de las imágenes en sección espacialmente vecinas de la imagen en sección X_k , $\chi(F_{k,k'}(X_k), X_{k'})$ una media de la distancia entre, por un lado, la proyección $F_{k,k'}(X_k)$ de la imagen en sección X_k sobre el plano soporte $P_{k'}$ de la imagen en sección espacialmente vecina $X_{k'}$ y, por otro lado, la imagen en sección espacialmente vecina $X_{k'}$, y $\lambda \geq 0$ es un parámetro de compromiso entre, por un lado, las distancias entre las proyecciones $F_{k,k'}(X_k)$ de las imágenes en sección X_k y las imágenes en sección espacialmente vecinas $X_{k'}$ de las imágenes en sección X_k , y, por otro lado, la regularización de translaciones $T_1 \dots T_m$.

Segunda variante para determinar el eje de rotación y la sucesión de translaciones de perturbación

15 [0098] Una segunda variante de la etapa 300 de determinación del eje de rotación *L* y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ se representa en la figura 7. Esta segunda variante de la etapa 300 vuelve a tomar ciertas etapas de la primera variante de la etapa 300.

20 [0099] Con referencia a esta figura, la etapa 300 de determinación del eje de rotación *L* y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende, siendo la velocidad angular en valor absoluto $|\tau|$ conocida, una etapa 314 de determinación de la dirección *a* del eje de rotación *L*, antes de una etapa 326 de determinación de un punto de paso u_0 del eje de rotación *L* y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$.

Determinación de la dirección del eje de rotación

25 [0100] La etapa 314 de determinación de la dirección *a* del eje de rotación *L* comprende una etapa 316, idéntica en la etapa 304 precedente, de determinación, para cada imagen en sección X_k , de las imágenes en sección espacialmente vecinas $X_{k'}$ de esta imagen en sección X_k .

30 [0101] La etapa 314 de determinación de la dirección *a* del eje de rotación *L* comprende además una etapa 318, idéntica en la etapa 306 precedente, de elección de un criterio de proximidad, según la cual el punto x' de una imagen en sección espacialmente vecina $X_{k'}$, más cercano de un píxel *s* de la imagen en sección X_k , es la posición $Proj_{k,k'}(s)$ de la proyección ortogonal σ' del punto del objeto *o* confundido con el píxel *s* de la imagen en sección X_k , sobre el plano soporte $P_{k'}$ de la imagen espacialmente vecina $X_{k'}$.

[0102] Así, la etapa 314 de determinación de la dirección *a* del eje de rotación *L* comprende además una etapa 320, de cálculo de la proyección ortogonal $F_{k,k'}(X_k)$ de la imagen en sección X_k sobre el plano soporte $P_{k'}$ de cada imagen en sección espacialmente vecina $X_{k'}$ de la imagen en sección X_k .

35 [0103] Preferentemente, la etapa 320 de cálculo de la proyección ortogonal $F_{k,k'}(X_k)$ se realiza mediante el cálculo de una transformación de afinidad $Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$ de la imagen en sección X_k , teniendo la transformación de afinidad $Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$ una componente de transformación lineal $Q_{k,k'}(a, \tau)$ y una componente de translación $v_{k,k'}$. La componente de transformación lineal $Q_{k,k'}(a, \tau)$ es una función de una dirección *a* de eje de rotación y de la velocidad de rotación τ , mientras que, contrariamente a la primera variante, la componente de translación $v_{k,k'}$ se considera como una variable, y no está por lo tanto expresada en función de los parámetros de movimiento del objeto *O*. La familia de los vectores de translación en las transformaciones de afinidad $F_{k,k'}$ se indicará en lo que sigue $v=(v_{k,k'})_{0 \leq k \leq m, k' \in N_k}$. La proyección ortogonal $F_{k,k'}(X_k)$ se expresa por lo tanto de la manera siguiente:

$$F_{k,k'}(X) = Aff(Q_{k,k'}(\bar{a}, \tau), v_{k,k'}, X),$$

con $Aff(Q, v, X)$ la transformada de afinidad de *X* definida por:

$$\forall x, \text{Aff}(Q, v, X)(x) = X(Q^{-1}(x - v))$$

con Q una matriz 2x2 invertible y v un vector de translación, y

$$Q_{i,j}(\bar{a}, \tau) = \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_j - t_i)} \pi_3,$$

donde

$$\pi_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

es la proyección sobre el plano XY,

$$\pi_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\pi_3 x$ es la posición en la referencia tridimensional XYZ de un punto x de una imagen en sección, confundiendo el plano soporte de la imagen en sección con el plano XY, y se destaca que para cada posible dirección a del eje de rotación, el signo de la velocidad angular τ está determinado por el sentido conocido (o supuesto) de rotación con respecto a la dirección a del eje de rotación, por ejemplo a partir del ajuste del sistema de formación de imágenes 10, mediante la relación siguiente:

$$\tau = \begin{cases} |\tau| & \text{para rotaciones positivas} \\ -|\tau| & \text{para rotaciones negativas} \end{cases}$$

(si el sentido de rotación se escoge arbitrariamente: en este caso, la representación tridimensional V del objeto O será en el peor de los casos la representación tridimensional V del espejo del objeto O).

[0104] La etapa 314 de determinación de la dirección a del eje de rotación L comprende además una etapa 322 de comparación de los valores $X_k(s)$ de los píxeles s de cada imagen en sección X_k con los valores $X_{k'}(x')$ de los puntos x' más cercanos de las imágenes en sección espacialmente vecinas $X_{k'}$. Preferentemente, la etapa 322 de comparación se realiza mediante el cálculo de una distancia $\chi(\text{Aff}(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k), X_{k'})$ entre la transformada de afinidad $\text{Aff}(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$ de la imagen en sección X_k y la imagen en sección vecina $X_{k'}$.

[0105] La etapa 314 de determinación de la dirección a del eje de rotación L comprende además una etapa 324 de minimización de una función de coste U, en la cual los componentes de translación $v_{k,k'}$ no se expresan en función de los parámetros del movimiento, sino que se dejan como variables de la función de coste U.

[0106] La etapa 324 de minimización de la función de coste U equivale por lo tanto a encontrar la dirección a de eje de rotación y la familia de componentes de translación $v_{k,k'}$ que minimizan la función de coste U.

[0107] Preferentemente, la función de coste U se determina mediante la relación:

$$U(\bar{a}, v) = \sum_k \sum_{k' \in N_k} \chi(\text{Aff}(Q_{k,k'}(\bar{a}, \tau), v_{k,k'}, X_k), X_{k'}),$$

con N_k el conjunto de los índices de las imágenes en sección vecinas a la imagen en sección X_k , $\chi(\text{Aff}(Q_{k,k'}(\bar{a}, \tau), v_{k,k'}, X_k), X_{k'})$ una medida de la distancia entre la transformada de afinidad de la imagen en sección X_k y la imagen en sección espacialmente vecina $X_{k'}$.

[0108] En la definición precedente de la función de coste U, los componentes de translación $v_{k,k'}$ son unas variables independientes de $u_0, a, \tau, T_1 \dots T_m$.

Determinación de un punto de paso del eje de rotación y de la sucesión de translaciones de perturbación

[0109] La dirección a del eje de rotación L y de los componentes de translación $v_{k,k'}$, llamados en lo que sigue componentes de translación de referencia $v_{k,k'}$, habiendo sido determinados, la etapa 326 de determinación de un punto de paso u_0 del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende una etapa 328 de expresión de componentes de translación $v_{k,k'}(u_0, a, T_1...T_m)$ en función de una sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ y de un punto de paso u_0 , siendo la dirección a del eje de rotación L y la velocidad de rotación τ conocidas:

$$v_{k,k'}(u_0, \bar{a}, \tau, T_1...T_m) = (\pi_2 - \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_k)})u_0 + \pi_2 \bar{T}_{k'} - \pi_2 R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_k)} \bar{T}_k,$$

donde

$$\bar{T}_k = R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_1)} T_1 + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_2)} T_2 + \dots + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_{k-1})} T_{k-1} + T_k,$$

la translación acumulada desde el instante inicial t_0 hasta el instante t_k de toma de la imagen en sección X_k con $T_0=0$.

[0110] La etapa 326 de determinación de un punto de paso u_0 del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende además una etapa 330 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ y del punto de paso u_0 , de modo que los componentes de translación $v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$ se aproximen a los componentes de translación de referencia $v_{k,k'}$.

[0111] Preferentemente, la etapa 330 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ y del punto de paso u_0 comprende una etapa 332 de minimización de una función de coste K que comprende una primera parte que representa, para una sucesión de translaciones $T_1...T_m$ de perturbación y un punto de paso u_0 , una distancia entre los componentes de translación $v_{k,k'}$ de referencia y los componentes de translación $v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$ expresados en función de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ y del punto de paso u_0 .

[0112] También preferentemente, la función de coste K comprende una segunda parte que representa la regularización Reg del valor $T_1...T_m$ de sucesión de translaciones de perturbación cuya minimización reduce la amplitud de las translaciones $T_1...T_m$. La función de regularización Reg es preferentemente una norma cuadrática, por ejemplo determinada mediante la relación:

$$Reg(T_1...T_m) = \|T\|_M^2 \equiv T' M T,$$

con M una matriz simétrica y definida positiva, y $T=T_1...T_m$ se escribe en la forma de un vector columna con las translaciones T_k seguidas unas de las otras. Por ejemplo, $M = I_{3m}$, la matriz identidad $3m \times 3m$.

[0113] Preferentemente, la función de coste K se determina mediante la relación:

$$K(x_0, T_1...T_m) = \sum_k \sum_{k' \in N_k} \|v_{k,k'} - v_{k,k'}(\bar{a}, \tau, T_1...T_m, x_0)\|^2 + \alpha Reg(T_1...T_m),$$

con $\alpha > 0$ un compromiso entre la separación cuadrática entre $v_{k,k'}$ y $v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$, y la regularización de $T_1...T_m$ para controlar la amplitud de las translaciones $T_1...T_m$.

Tercera variante para determinar el eje de rotación y la sucesión de translaciones de perturbación

[0114] Una tercera variante de la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ se representa en la figura 8.

[0115] Con referencia a esta figura 8, la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$ comprende una etapa 334 de determinación de la dirección a del eje de rotación L , en el transcurso de la cual las translaciones de perturbación $T_1...T_m$ se consideran como despreciables (lo cual significa que el movimiento del objeto O se considera como una rotación estable alrededor del eje de rotación L),

Determinación de la dirección del eje de rotación

[0116] La etapa 334 de determinación de la dirección a comprende una etapa 336 de determinación de una proyección L_{XY} del eje de rotación L sobre el plano de corte P , a partir de las imágenes en sección $X_0 \dots X_m$.

Determinación de una proyección del eje de rotación sobre el plano de corte

5 [0117] El procedimiento para determinar la proyección L_{XY} utiliza el hecho de que cada píxel s y su punto simétrico $L_{XY}(s)$ sobre el plano de corte P con respecto a la proyección $L_{XY}(s)$, tienen unos histogramas h_s y $h_{L_{XY}(s)}$ que son cercanos. Esto es debido a que, en el transcurso de una rotación del objeto O , el píxel s y su punto simétrico $L_{XY}(s)$ toman sensiblemente los mismos valores, con simplemente una separación temporal correspondiente al tiempo que tarda el punto o del objeto O para desplazarse del píxel s a su punto simétrico $L_{XY}(s)$.

10 [0118] En el transcurso de la etapa 336, la proyección L_{XY} del eje de rotación L sobre el plano de corte P se determina escogiendo la línea l_{XY} del plano de corte P que tiene el nivel de simetría de histogramas más elevado, es decir, tal que los histogramas h_s y $h_{l_{XY}(s)}$ de cada píxel s y de su punto simétrico $l_{XY}(s)$ sean cercanos.

15 [0119] Así, la etapa 336 de determinación de una proyección L_{XY} comprende, para cada píxel s de la rejilla G , una etapa de cálculo 338 de un histograma h_s de los niveles de gris que toma este píxel s en al menos una parte de las imágenes en sección X_0, \dots, X_m . El histograma h_s representa el descuento de los valores del píxel s , sin tener en cuenta el orden en el cual estos valores aparecen en la secuencia de imágenes en sección X_0, \dots, X_m .

[0120] Preferentemente, la parte de imágenes en sección corresponde a las imágenes en sección $X_0, \dots, X_{m'}$ (con $m' \leq m$) adquiridas mientras el objeto O realiza un número entero de rotaciones alrededor del eje de rotación L . Esto se traduce en:

$$t_{m'} - t_0 \approx \frac{2\pi r}{|\omega|}$$

20

para un número entero r

[0121] La etapa 336 de determinación de una proyección L_{XY} comprende además una etapa 340 de determinación, para cada píxel s de la rejilla G y para una línea l_{XY} del plano de corte P , de un histograma $h_{l_{XY}(s)}$ de los niveles de gris que toma el punto simétrico $l_{XY}(s)$ de este píxel s en la parte precedente de las imágenes en sección.

25 [0122] La etapa 336 de determinación de una proyección L_{XY} comprende además una etapa 342 de determinación de las distancias $\Delta(h_s, h_{l_{XY}(s)})$ entre el histograma h_s de cada píxel s y el histograma $h_{l_{XY}(s)}$ del punto simétrico $l_{XY}(s)$. La distancia Δ es por ejemplo la distancia de tipo Kolmogorov-Smirnov:

$$\Delta(h, h') = \sup_x | \bar{h}(x) - \bar{h}'(x) |,$$

con

$$\bar{h}(x) = \sum_{y \leq x} h(y).$$

30

[0123] La etapa 336 de determinación de una proyección L_{XY} comprende además una etapa 344 de minimización de una función de coste Ψ , que representa, para una línea l_{XY} del plano de corte P , las diferencias entre el histograma h_s de cada píxel s y el histograma $h_{l_{XY}(s)}$ del punto simétrico $l_{XY}(s)$ con respecto a la línea l_{XY} . Preferentemente, la función de coste Ψ se determina mediante la relación:

$$\Psi(l_{XY}) = \sum_{s \in G} \Delta(h_s, h_{l_{XY}(s)}).$$

35

[0124] L_{XY} se determina como la línea l_{XY} sobre el plano XY que minimiza la función de coste Ψ .

Determinación del ángulo entre el eje de rotación y su proyección

5 **[0125]** La etapa 334 de determinación de la dirección a comprende además una etapa 346 de determinación del ángulo entre el eje de rotación L y su proyección L_{XY} sobre el plano de corte P . Este ángulo entre el eje de rotación L y su proyección L_{XY} se determina calculando el ángulo Φ entre el eje Z de la referencia XYZ (perpendicular al plano de corte P) y el eje de rotación L .

[0126] Con referencia a la figura 9, la etapa 346 de determinación del ángulo Φ utiliza el hecho de que puntos o del objeto O describen, en el transcurso del tiempo, un círculo respectivo, centrado sensiblemente sobre el eje de rotación L , cortando este círculo el plano de corte P , por un lado, en un píxel s y, por otro lado, en su punto simétrico $L_{XY}(s)$ con respecto a la proyección L_{XY} .

10 **[0127]** Volviendo a la figura 8, la etapa 346 de determinación del ángulo Φ comprende una etapa 348 de determinación, para cada píxel s de la rejilla G , de un tiempo $t(s)$, llamado tiempo de simetrización. El tiempo de simetrización $t(s)$ de un píxel s es el tiempo necesario para un punto o del objeto O para desplazarse desde este píxel s hasta el punto simétrico $L_{XY}(s)$ con respecto a la proyección L_{XY} .

15 **[0128]** Esto se traduce en el hecho de que el valor $X_k(s)$ de un píxel s sobre una imagen en sección X_k tomada en un instante t_k es sensiblemente igual al valor $X_k(L_{XY}(s))$ del punto simétrico $L_{XY}(s)$ sobre una imagen en sección X_k tomada en un instante t_k desplazado sensiblemente del tiempo de simetrización $t(s)$ con respecto al instante de toma t_k .

20 **[0129]** Así, el tiempo de simetrización $t(s)$ se determina preferentemente determinando el mejor desplazamiento temporal entre los dos vectores $(X_0(s), X_1(s), \dots, X_m(s))$ y $(X_0(L_{XY}(s)), X_1(L_{XY}(s)), \dots, X_m(L_{XY}(s)))$. Así, el vector desplazado de tiempo m del vector $(X_0(L_{XY}(s)), X_1(L_{XY}(s)), \dots, X_m(L_{XY}(s)))$ se define mediante $v(m) = (X_{q(t_0+\mu)}(L_{XY}(s)), X_{q(t_1+\mu)}(L_{XY}(s)), \dots, X_{q(t_{j(\mu)+\mu}}(L_{XY}(s)))$, con $j(\mu)$ tal como $j(\mu) + 1$ sea el número de imágenes tomadas entre el instante t_0 y el instante $t_m - m$, y $q(t)$ tal como el instante de toma $t_q(t)$ sea el instante más cercano al instante t entre todos los instantes de toma de imágenes en sección. Preferentemente, el error de desplazamiento se determina mediante

$$Err(\mu) = \kappa((X_0(s), X_1(s), \dots, X_{j(\mu)}(s)), v(\mu)),$$

25 con $\kappa(u, v)$ una medida de distancia entre dos vectores u y v , κ se escoge por ejemplo como siendo una distancia cuadrática normalizada:

$$\kappa(u, v) = \frac{1}{l} \sum_i (u_i - v_i)^2$$

con l la longitud des vectores. Así $t(s)$ se obtiene minimizando el error de desplazamiento $Err(\mu)$:

$$t(s) = \arg \min_{0 \leq \mu < p} Err(\mu),$$

30 con $p = 2\pi/|\tau|$ el periodo de revolución.

[0130] La etapa 346 de determinación del ángulo Φ comprende además una etapa 350 de determinación del ángulo Φ a partir de los tiempo de simetrización $t(s)$.

35 **[0131]** La etapa 350 de determinación del ángulo Φ a partir de los tiempo de simetrización $t(s)$ comprende una etapa 352 de determinación de una dirección b de la proyección L_{XY} , con $\|b\| = 1$, así como de un punto de paso y_0 de la proyección L_{XY} . La proyección L_{XY} se determina mediante su dirección y el punto de paso (y_0, b) . La dirección b de la proyección L_{XY} se escoge como siendo, con un error de una constante positiva multiplicativa, la proyección sobre el plano XY de la dirección del eje de rotación a que se determina en lo que sigue:

$$\vec{b} = \pi_{XY}(\vec{a}) / \|\pi_{XY}(\vec{a})\|,$$

con

$$\pi_{XY} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

la matriz de proyección sobre el plano XY. Así, se supone que el sentido de rotación del objeto O con respecto a la dirección del eje de rotación a que se determina a continuación, es conocido (o supuesto), por ejemplo según el ajuste del sistema de la formación de imágenes 10, una vez escogida la dirección b (tal que $b = \pi_{XY}(a) / |\pi_{XY}(a)|$).

5 Así, se determina la velocidad angular τ de rotación:

$$\tau = \begin{cases} |\tau| & \text{para rotaciones positivas} \\ -|\tau| & \text{para rotaciones negativas} \end{cases}$$

10 Si el sentido de rotación del objeto es desconocida, se escoge arbitrariamente: en este caso, la representación tridimensional V del objeto O será en el peor de los casos la representación tridimensional V del espejo del objeto O.

[0132] La etapa 350 de determinación del ángulo ϕ a partir de los tiempo de simetrización $t(s)$ comprende además una etapa 354 de determinación, para cada píxel s, de una distancia z(s) entre, por un lado, el medio

$$\frac{s + L_{XY}(s)}{2}$$

15 del segmento entre el píxel s y son simétrica $L_{XY}(s)$ con respecto a la proyección L_{XY} , y, por otro lado, el centro c(s) del círculo alrededor del cual gira un punto o del objeto O que pasa por el píxel s. Esta distancia es positiva si el centro c(s) está por encima del plano XY, es nula si c(s) está en el plano XY, y negativa en los demás casos.

[0133] Preferentemente, la distancia z(s) se determina mediante la relación:

$$z(s) = d(s) \frac{\|s - L_{XY}(s)\|}{2 \tan(\frac{t(s)\tau}{2})}$$

con $t(s)\tau$ el ángulo del arco del círculo desde s hasta el punto simétrico $L_{XY}(s)$ según el sentido de rotación,

$$d(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \in P^R \\ -1 & \text{si } s \in P^L \end{cases}$$

20 siendo P^R y P^L los dos semi-planos del plano de corte P separados por la proyección L_{XY} , P^R y P^L se definen mediante:

$$P^L = \{s \in P : \langle \bar{b} \wedge (s - y_0), \bar{e}_3 \rangle \geq 0\}$$

$$P^R = \{s \in P : \langle \bar{b} \wedge (s - y_0), \bar{e}_3 \rangle < 0\},$$

$$\bar{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

25 con \wedge el producto vectorial, $\langle \dots \rangle$ el producto escalar, y dependen de la posición de y_0 sobre la proyección L_{XY} . la dirección del eje Z de la referencia. P^R y P^L no

[0134] En teoría, hay una relación de afinidad entre la distancia $z(s)$ y la posición sobre proyección L_{XY} del eje de

rotación, del punto $\frac{s + L_{XY}(s)}{2}$ (que es también la proyección de s sobre la proyección L_{XY} del eje de rotación) con respecto al punto y_0 :

$$z(s) = \langle s - y_0, \vec{b} \rangle \cos \phi + z_0,$$

5 con $z_0 \geq 0$ si la proyección del punto y_0 sobre el eje de rotación L está por encima del plano XY o en el plano XY y $z_0 < 0$ en caso contrario, y $|z_0|$ es la distancia entre y_0 y el eje de rotación L .

[0135] Así, preferentemente, la etapa 350 de determinación del ángulo ϕ a partir de los tiempo de simetrización $t(s)$ comprende además una etapa 356 de determinación del ángulo ϕ mediante regresión de la relación de afinidad precedente:

$$10 \quad (\phi, z_0) = \arg \min_{\phi, z_0} \sum_{s \in G_{\delta, \sigma_{\min}}} (z(s) - \langle s - \hat{y}_0, \vec{b} \rangle \cos \hat{\phi} - \hat{z}_0)^2,$$

con $G_{\delta, \sigma_{\min}}$ el conjunto de los píxeles s de la rejilla G cuya distancia con respecto a la proyección L_{XY} del eje de rotación sobrepasa un determinado umbral δ y de modo que la variancia empírica de los niveles de gris que toma el píxel s en la secuencia de imágenes en sección X_0, \dots, X_m sobrepasa un determinado umbral σ_{\min}^2

15 [0136] En la práctica, δ se escoge entre 4 y 20 píxeles, σ_{\min}^2 es por ejemplo el q -cuantil de las variancias empíricas de los niveles de gris, calculadas para cada píxel s de la rejilla G , que toma el píxel s en la secuencia de imágenes en sección X_0, \dots, X_m (lo cual significa que la proporción de los píxeles s de la rejilla G , donde la variancia empírica calculada de los niveles de gris es inferior o igual a q), q vale entre 60% y 95% en general.

20 [0137] El hecho de limitar la regresión precedente a los píxeles en $G_{\delta, \sigma_{\min}}$ permite mejorar la robustez de la estimación utilizando solamente los tiempos de simetrización para los píxeles en $G_{\delta, \sigma_{\min}}$ que son en general más fiables.

[0138] La etapa 334 de determinación de la dirección a comprende además una etapa 358 de determinación de la dirección a , a partir de la proyección L_{XY} y del ángulo ϕ . La dirección a del eje de rotación L se determina por ejemplo mediante el vector de coordenadas esféricas $(1, \theta, \phi)$, con θ el ángulo entre el eje X y la dirección b de la proyección L_{XY} , de modo que $b = \pi_{XY}(a) \wedge |\pi_{XY}(a)|$.

25 *Determinación opcional del punto de paso del eje de rotación*

30 [0139] Como complemento opcional, la etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende además una etapa 360 de determinación de un punto de paso u_0 del eje de rotación L , a partir del o de los tiempos de simetrización $t(s)$. Preferentemente, escogiéndose el punto de paso u_0 como el punto de intersección entre el eje de rotación L y la recta perpendicular al plano XY y que pasa por el punto y_0 . El punto de paso u_0 se proporciona en este caso mediante la relación siguiente:

$$u_0 = y_0 + \frac{z_0}{\sin \phi} \vec{e}_3,$$

Determinación de la sucesión de translaciones de perturbación

35 [0140] La etapa 300 de determinación del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende además una etapa 362 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$, realizada de la misma manera que en la etapa 330.

[0141] Más concretamente, la etapa 362 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende una etapa 364 de determinación, de la misma manera que en la etapa 324, de los vectores de translación de referencia $v_{k,k}$, de las transformaciones de afinidad $F_{k,k'}$, cuyos valores minimizan la función de coste U , con la dirección a del eje de rotación L y la velocidad angular $\dot{\phi}$ conocidas.

[0142] Gracias al conocimiento de la dirección a del eje de rotación, la minimización de U se simplifica ampliamente, minimizando independientemente cada término $\chi(Aff(Q_{k,k}(a, \tau), v_{k,k}, X_k), X_k)$ para determinar individualmente cada vector de translación de referencia $v_{k,k}$.

5 [0143] La etapa 362 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ comprende además una etapa 366 de determinación de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ y del punto de paso u_0 que tiene los valores que minimizan la función de coste K de la etapa 332, conociendo los vectores de translación de referencia $v_{k,k}$.

10 [0144] Como variante, cuando se realiza la etapa opcional 360, la minimización de la función de coste K se simplifica utilizando el punto de paso u_0 determinado en esta etapa. Por otro lado, la etapa 366 vuelve a determinar la sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$ que tiene el valor que minimiza la función de coste K , siendo el punto de paso u_0 conocido.

Determinación de una representación tridimensional del objeto

15 [0145] Con referencia a la figura 10, la etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende una etapa 402 de determinación de un volumen D , incluido en el volumen U de la cámara 20, sobre el cual será « reconstruido » el objeto O . El volumen D comprende el objeto O (al menos en parte) y su entorno cercano. Por ejemplo, el volumen D es un paralelepípedo.

20 [0146] La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 404 de determinación de un conjunto Ω de puntos u del volumen D y de un valor $X(u)$ de cada uno de estos puntos u en un instante de referencia. En lo que sigue, el instante inicial t_0 se escogerá como instante de referencia. El conjunto Ω de puntos u comprende en particular puntos o del objeto O en su posición O_0 en el instante inicial t_0 .

[0147] Se destacará que, en una implementación muy simple, el conjunto Ω de puntos u forma ya una representación tridimensional del objeto, estando esta última determinada por la constelación de los puntos del conjunto Ω .

25 [0148] La etapa 404 de determinación del conjunto de puntos Ω se realiza a partir de las posiciones del objeto O con respecto al plano de corte P en cada instante de toma de vista $t_0 \dots t_m$, y de la secuencia de imágenes en sección $X_0 \dots X_m$.

30 [0149] Más concretamente, la etapa 404 de determinación del conjunto de puntos Ω comprende una etapa 406 de cálculo, para cada imagen en sección X_k , de la posición $C_k(s)$ de cada píxel s de la imagen en sección X_k en el instante inicial t_0 , suponiendo que este píxel aparece debido al objeto O . El cálculo se hace a partir de los parámetros del movimiento del objeto O (velocidad angular τ , eje de rotación L , sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$) determinados anteriormente. La posición $C_k(s)$ de cada punto u del conjunto Ω se da de un píxel s de origen respectivo de una imagen X_k , mediante:

$$C_k(s) = R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_0)}^t (\pi_3 s - u_0 - \bar{T}_k) + u_0$$

con

35
$$\bar{T}_k = R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_1)} T_1 + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_2)} T_2 + \dots + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_{k-1})} T_{k-1} + T_k ,$$

con $T_0 = 0$, es la matriz transpuesta del conjunto Ω que se constituye mediante puntos u del volumen D de posición $C_k(s)$ para cada píxel s y cada imagen en sección X_k . Se dice así que s y X_k son respectivamente el píxel y la imagen de origen del punto u . Se destaca que $C_k(s)$ es también la posición en la referencia del objeto O escogida del píxel s del plano de corte en el instante de toma t_k de la imagen en sección X_k .

40 [0150] Cada uno de los puntos u del conjunto Ω se asocia al valor $X_k(s)$ del píxel s de origen de la imagen en sección de origen X_k : $X(u) = X_k(s)$.

[0151] Se destacará que el conjunto Ω puede así comprender varias veces un mismo punto u , cada vez asociado a un valor respectivo, proviniendo estos diferentes valores de diferentes imágenes en sección.

45 [0152] La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 408 de elección de una función de representación tridimensional V_β parametrizable con parámetros β , y de una operación Op que proporciona, a partir de la función de representación tridimensional V_β , una función de estimación $X = Op(V_\beta)$ del valor de cada punto u del conjunto Ω .

[0153] Una vez determinados los parámetros β , la representación tridimensional V se determina mediante la función de representación tridimensional V_β , preferentemente en todo punto del volumen D .

5 [0154] *Primera variante de función de representación tridimensional V_β* Con referencia a la figura 11, en una primera variante, la función de representación tridimensional V_β , escogida en el transcurso de la etapa 408, es una descomposición en funciones B-spline de grado r con nodos w espaciados de manera igual en el espacio:

$$w = b + (a_1 k_1, a_2 k_2, a_3 k_3),$$

con $b \in R^3$, y a_1, a_2 y a_3 respectivamente el paso de muestreo en las direcciones X, Y, y Z, y k_1, k_2, k_3 números enteros. Cada parámetro de la función de representación tridimensional V_β está asociada a un nodo respectivo.

[0155] La función de representación tridimensional V_β se escribe:

$$\forall u = (u_1, u_2, u_3) \in D,$$

10

$$V(u) = \sum_{w=(w_1, w_2, w_3) \in W} \eta\left(\frac{u_1 - w_1}{a_1}\right) \eta\left(\frac{u_2 - w_2}{a_2}\right) \eta\left(\frac{u_3 - w_3}{a_3}\right) \beta(w),$$

con η la función B-spline central de grado r definida sobre el conjunto de los nombres reales R , W el conjunto de los

$$\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$$

nodos en el volumen D . η es por ejemplo la función indicadora sobre el intervalo $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$, convolucionada r veces consigo misma:

$$\eta(x) = \underbrace{1_{\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]} * 1_{\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]} * \dots * 1_{\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]}}_{r+1 \text{ fois}}(x).$$

15 [0156] En particular, si $r = 3$ (función B-spline cúbica):

$$\eta(x) = \begin{cases} \frac{2}{3} - x^2 + \frac{|x|^3}{2}, & \text{if } 0 \leq |x| < 1 \\ \frac{(2 - |x|)^3}{6}, & \text{if } 1 \leq |x| < 2. \\ 0, & \text{if } |x| \geq 2 \end{cases}$$

en esta primera variante, la operación Op se escoge como la función identidad, de manera que la función de estimación X del valor de cada punto u del conjunto Ω es igual a la función de representación tridimensional V_β : $X(u) = V_\beta(u)$.

20 [0157] Con esta elección de función de representación tridimensional V_β , la etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 410 de división del volumen D en una pluralidad de sub-volúmenes D_i , separados entre sí. Como variante, los bordes de los sub volúmenes D_i se solapan. De esta manera, los nodos w también están divididos en grupos $\{w\}_i$ cada uno asociado a un sub volumen D_i respectivo. Asimismo, los puntos del conjunto Ω están divididos en grupos \wedge_i cada uno asociado a un sub volumen D_i respectivo.

25

[0158] Más concretamente, cada grupo $\{w\}_i$ comprende los nodos situados en el sub volumen respectivo D_i y los parámetros $\{\beta\}_i$ de estos nodos $\{w\}_i$ están así asociados al sub volumen D_i . Asimismo, los puntos de cada grupo Ω_i , son los puntos del conjunto Ω situados en el sub volumen D_i .

[0159] La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 412 de determinación de los parámetros β , tales como, para cada punto u del conjunto Ω , la estimación $X(u)$ del valor del punto u da sensiblemente el valor $X(u)$ del punto u .

5 [0160] Más concretamente, la etapa 412 de determinación de los parámetros β comprende, para cada sub volumen D_i , una etapa 414 de determinación de los parámetros $\{\beta\}_i$ asociados a este sub volumen D_i , tales que, para cada punto u del grupo Ω_i y de los grupos directamente contiguos al grupo Ω_i , la estimación $X(u)$ del valor del punto u da sensiblemente el valor $X(u)$ del punto u , estando los parámetros $\{\beta\}_{j \neq i}$ asociados a los otros subconjuntos $D_{j \neq i}$ fijados en un valor determinado.

10 [0161] La etapa 414 de determinación de los parámetros $\{\beta\}_i$ se realiza varias veces, de manera iterativa, barriendo en cada ocasión todos los sub volúmenes D_i : en el transcurso de la primera iteración, se determina sucesivamente cada grupo de parámetros $\{\beta\}_i$ (para la determinación de un grupo de parámetro $\{\beta\}_i$, el valor determinado de cada uno de los otros grupos de parámetro $\{\beta\}_{j \neq i}$ se fija en un valor predeterminado, por ejemplo nulo); en el transcurso de las iteraciones ulteriores, se determina sucesivamente cada grupo de parámetros $\{\beta\}_i$ (para la determinación de un grupo de parámetro $\{\beta\}_i$, el valor determinado de cada uno de los otros grupos de parámetro $\{\beta\}_{j \neq i}$ es el último resultado determinado previamente).

[0162] Preferentemente, los parámetros $\{\beta\}_i$ se determinan minimizando la función de coste siguiente:

$$U(\beta) = \sum_{u \in \Omega} (\tilde{X}(u) - X(u))^2 + \lambda \beta' A \beta,$$

20 [0163] A es una matriz simétrica definida positiva, o de manera más general semi definida positiva, $\beta' A \beta$ es una medida de la irregularidad cuadrática, y $\lambda > 0$ es un compromiso entre la adecuación de la función de representación tridimensional y la regularidad.

Segunda variante de función de representación tridimensional V_β

[0164] Con referencia a la figura 12, la función de representación tridimensional V_β , escogida en el transcurso de la etapa 408, se escribe en la forma de una descomposición en funciones radiales de base (« Radial Basis Function » o RBF) con los nodos w :

$$\forall u \in D, V_\beta(u) = \sum_{w \in W} \phi(u - w) \beta(w),$$

25

con W el conjunto de los nodos en el volumen D .

[0165] La función $\phi(u-w)$ depende de la distancia entre el punto u y el nodo w , pero no de la dirección entre el punto u y el nodo w . Por ejemplo, $\phi(x) = \exp(-c |x|^2)$ o $\phi(x) = \eta(|x|)$ con η la función B-spline central cúbica.

30 [0166] Además, la operación Op da una función de estimación $X = Op(V_\beta, f_R)$ del valor de cada punto u del conjunto Ω a partir de la función de representación tridimensional V_β y de una función de difusión del punto f_R . En el ejemplo descrito, la operación Op es una convolución de la función de representación tridimensional V_β con la función de difusión del punto f_R siguiente: $f_R(u) = f(Ru)$, con f la función de difusión del punto sin rotación, que es conocida (por ejemplo, determinada por el constructor del sistema de formación de imágenes, o determinada experimentalmente), f_R la función de difusión del punto para la rotación R , y Ru el punto resultante de la rotación del punto u por la rotación R .

35

[0167] La función de difusión del punto f_R depende de la rotación R entre la posición del objeto O en el instante t_k de toma de la imagen en sección X_k respectiva asociada al punto u , y la posición del objeto O en el instante de referencia t_0 :

$$R = R_{\vec{a}, r(t_k - t_0)}$$

40 Así, para cada punto u del conjunto Ω ,

$$\tilde{X}(u) = Op(V_\beta, f_R)(u) = (V_\beta * f_R)(C_k(s)),$$

con * la operación de convolución, siendo el píxel s y la imagen en sección X_k (del instante de toma t_k) respectivamente el píxel y la imagen de origen del punto u .

[0168] Debido a la selección de funciones radiales de base ϕ , se obtiene la propiedad de que, para cada punto u del volumen D :

$$Op(\phi, f_R)(u) = Op(\phi, f)(Ru),$$

5

es decir:

$$(\phi * f_R)(u) = (\phi * f)(Ru)$$

con * la operación de convolución, R una rotación cualquiera.

[0169] Así, La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 416 de determinación de los parámetros β de la función de representación tridimensional V_β minimizando la función de coste siguiente:

$$E(\beta) = \sum_{u \in \Omega} \left(X(u) - \sum_{w \in W} (\phi * f)(\pi_3 s - \zeta_i - R_i w) \beta(w) \right)^2 + \lambda \beta' A \beta,$$

donde s y la imagen en sección X_i (del instante de toma t_i) son respectivamente el píxel y la imagen de origen del

$$R_i = R_{\bar{a}, \tau(t_i - t_0)}$$

punto u ,

y

$$\zeta_i = \bar{T}_i + u_0 - R_{\bar{a}, \tau(t_i - t_0)} u_0.$$

15

[0170] De manera ventajosa, esta minimización se realiza calculando una única convolución (la convolución $\phi * f$) y resolviendo el sistema lineal, que se deriva del cálculo de la convolución $\phi * f$, sobre los parámetros β . De este modo, los parámetros β se determinan fácilmente.

Variante de determinación del conjunto Ω

[0171] La figura 13 ilustra una variante de realización de la etapa 404 de determinación de un conjunto Ω de puntos u del volumen D y de un valor $X(u)$ de cada uno de estos puntos u en un instante de referencia, con el fin de determinar el conjunto de puntos Ω a partir de varias secuencias de imágenes en sección, indicadas S_l con $l = 1 \dots l$.

$$X_0^l, X_1^l, \dots, X_{m_l}^l,$$

Cada secuencia S_l está compuesta por las imágenes en secciones , en unos instantes

$$t_0^l, t_1^l, \dots, t_{m_l}^l,$$

de tomas de vista, respectivos.

[0172] En esta variante, la etapa 404 de determinación del conjunto de puntos Ω comprende una etapa 420 de determinación de una función de representación tridimensional V_l , sobre un sub volumen respectivo D_l , para cada secuencia S_l . Esta etapa 420 se realiza por ejemplo según las etapas 408 a 416 anteriores para cada secuencia S_l .

[0173] Cada función de representación tridimensional V_l da una representación del objeto O en una posición respectiva, indicada O_l .

[0174] La etapa 404 de determinación del conjunto de puntos Ω comprende además una etapa 422 de discretización de cada sub volumen D_l según una rejilla tridimensional G_3 . Se obtiene así, para cada secuencia S_l , un sub volumen discretizado D_l , que agrupa los puntos del sub volumen D_l situados sobre la rejilla tridimensional G_3 . Se obtiene así: $\forall u \in D_l, V_l(u) = V(u)$.

[0175] Preferentemente, la rejilla tridimensional G_3 a un paso que es inferior o igual al de la rejilla G del plano de corte P .

5 **[0176]** La etapa 404 de determinación del conjunto de puntos Ω comprende además una etapa 424 de determinación, para cada secuencia S_l , de una rotación Q_l y de una translación h_l que permite sensiblemente colocar todas las posiciones O_l de las representaciones del objeto O en una misma posición de referencia.

[0177] Preferentemente, la posición de referencia es la de una de las secuencias S_l . En lo que sigue, la posición O_l del objeto de la primera secuencia S_l será la posición de referencia. Así, un punto o del objeto O de la posición u en O_l es en la posición $Q_l u + h_l$ en O_l , con $l = 1$.

10 **[0178]** La etapa 424 de determinación, para cada secuencia S_l , de una rotación Q_l y de una translación h_l comprende una etapa 426 de determinación de un nivel de cuantil q , de modo que sensiblemente los puntos luminosos del objeto O tengan valores $V_l(u)$ superiores o iguales al q -cuantil $\rho(q)$, para cada subconjunto discretizado D_l . Por ejemplo, el nivel de cuantil q se toma entre 60% y 95%.

15 **[0179]** La etapa 424 de determinación, para cada secuencia S_l , de una rotación Q_l y de una translación h_l comprende además una etapa 428 de selección de al menos tres grupos $g_1 \dots g_k$, preferentemente cuatro o más, de puntos del subconjunto discretizado D_l , según un criterio de selección. El criterio de selección es el mismo para todas las secuencias S_l . El criterio de selección se aplica en particular sobre el valor de los puntos del subconjunto discretizado D_l .

20 **[0180]** Aplicando así el mismo criterio de selección a todas las secuencias S_l , es posible obtener sensiblemente los mismos puntos del objeto O para todas las secuencias S_l , incluso si estos puntos no tienen la misma posición para las diferentes secuencias S_l .

[0181] En una primera variante representada en la figura 13, la etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$, comprende una etapa 430 de selección de un mismo número n de los puntos más luminosos (que tienen los valores más elevados). Preferentemente, el número n es el entero más cercano de $\min(qn_1, \dots, qn_l)$ (q se expresa en porcentaje), con n_1, \dots, n_l los números de puntos en los subconjuntos discretizados $D_1 \dots D_l$.

25 **[0182]** La etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$ comprende además una etapa 432 de clasificación, para cada secuencia S_l , de los n puntos más luminosos (seleccionados anteriormente) según su valor, en el orden decreciente por ejemplo.

30 **[0183]** La etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$ comprende además una etapa 434 de división de los n puntos más luminosos clasificados en k grupos $g_1 \dots g_k$ de tamaño sensiblemente igual: los puntos del grupo g_1 son más luminosos que los del grupo g_2 , que son más luminosos que los de g_3 , etc.

[0184] En una segunda variante representada en la figura 14, la etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$, comprende una etapa de cálculo 436, para cada secuencia S_l , del baricentro b_l de los puntos u del subconjunto D_l , cuyos valores son superiores al q -cuantil $\rho_l(q)$. El conjunto de estos puntos se indicará en lo que sigue $D_{l,q}$. Para el cálculo del baricentro b_l , todos los puntos tienen la misma ponderación.

35 **[0185]** La etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$, comprende además una etapa 437 de determinación de la distancia más elevada entre el baricentro y los puntos de todos los conjuntos $D_{l,q}$. Esta distancia será llamada en lo que sigue radio r .

[0186] Preferentemente, el radio r viene dado por:

$$r = \min \left(\max \{ \|u - b_1\| : u \in \tilde{D}_{1,q} \}, \dots, \max \{ \|u - b_l\| : u \in \tilde{D}_{l,q} \} \right)$$

40 **[0187]** La etapa 428 de selección de los grupos $g_1 \dots g_k$, comprende además una etapa 438 de división del radio r (es decir del segmento $[0, r]$) en k segmentos de tamaños iguales ($seg_i = [(k-i)r/k, (k-i+1)r/k]$, con $1 \leq i \leq k$), estando cada grupo $g_1 \dots g_k$ asociado a un segmento respectivo.

[0188] Más concretamente, para cada secuencia S_l , cada grupo g_i comprende los puntos u de $D_{l,q}$ cuya distancia al baricentro b_l está comprendida en el segmento seg_i asociado.

45 **[0189]** Volviendo a la figura 13, la etapa 424 de determinación, para cada secuencia S_l , de una rotación Q_l y de una translación h_l comprende además una etapa 440 de determinación, para cada secuencia S_l , del baricentro $\bar{\omega}_{l,i}$ de los puntos u de cada uno de los grupos g_i . Para el cálculo de los baricentros $\omega_{l,i}$, los puntos tienen unas ponderaciones idénticas.

50 **[0190]** La etapa 424 de determinación, para cada secuencia S_l , de una rotación Q_l y de una translación h_l comprende además una etapa 442 de determinación de la rotación Q_l y de la translación h_l a partir de los baricentros $\omega_{l,i}$.

[0191] Preferentemente, las rotaciones Q_l y las translaciones h_l se determinan mediante la minimización de una función de coste:

$$(Q_l, h_l) = \arg \min_{Q \in O(3), h \in \mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^k \| Q \omega_{l,i} + h - \omega_{l,i} \|^2,$$

con $O(3)$ el conjunto de las matrices ortogonales 3-par-3.

5 [0192] Preferentemente, la solución de la minimización precedente se obtiene calculando:

$$\begin{cases} Q_l = P_l P_l' \\ h_l = \bar{\omega}_l - Q_l \bar{\omega}_l \end{cases}$$

con $\bar{\omega}_l = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \omega_{l,i}$ y $\bar{\omega}_l = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \omega_{l,i}$, y P_l y P_l' obtenidos por descomposición de valores singulares ("singular

$$M = \sum_{i=1}^k (\omega_{l,i} - \bar{\omega}_l)(\omega_{l,i} - \bar{\omega}_l)'$$

value decomposition" o SVD) de la matriz M , es decir con P_l y P_l' matrices ortogonales 3-por-3, y Λ una matriz diagonal con números no negativos en la diagonal.

10 [0193]. La etapa 404 de determinación del conjunto de puntos \wedge , comprende además una etapa 444 de determinación de los puntos u de Ω et de un valor $X(u)$ de cada uno de estos puntos u , a partir de las secuencias de imágenes en sección S_l con $l = 1 \dots L$, siendo las matrices de rotación Q_l y las translaciones h_l conocidas: el conjunto Ω está constituido por los puntos u del volumen D de posición

$$Q_l^t R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_0)}^t (\pi_3 s - u'_0 - \bar{T}_k^t) + Q_l^t (u'_0 - h_l),$$

15 para cada píxel s de cada imagen en sección X_k^l de cada secuencia S_l , con τ_l , a_l , u'_0 y T_k^l que son respectivamente los parámetros del movimiento para la secuencia S_l , $Q_1 = I_3$ la matriz identidad 3-por-3, $h_l = 0$,

$$\bar{T}_k^l = R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_1)} T_1^l + R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_2)} T_2^l + \dots + R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_{k-1})} T_{k-1}^l + T_k^l$$

Se dice así que s , X_k^l , t e S_l son respectivamente el píxel, la imagen y la secuencia de origen del punto u .

[0194] Cada uno de los puntos u del conjunto Ω está asociado al valor $X_k^l(s)$ del píxel s de la imagen en

20 sección X_k^l de la secuencia S_l : $X(u)$ con s , X_k^l y S_l siendo respectivamente el píxel, la imagen y la secuencia de origen del punto u

Consideración de la duración de adquisición

25 [0195] En el transcurso de la toma de las imágenes en sección, el objeto O se desplaza durante el tiempo de exposición para crear una imagen sobre el plano focal. Esto genera una borrosidad de movimiento suplementaria no despreciable (además de la borrosidad definida por la función de difusión del punto).

[0196] Esta borrosidad de movimiento, en un modo de realización de la invención, se considera en la etapa 400 de la representación tridimensional V del objeto O , preferentemente cuando el tiempo de exposición es relativamente

largo con respecto al tiempo necesario para pasar de una imagen en sección X_k a la imagen en sección siguiente X_{k+1} .

5 **[0197]** Así, con referencia a la figura 15, en una tercera variante, la etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende una etapa 450 de determinación de un intervalo de adquisición $I_k = [t_k + \delta_0; t_k + \delta_0 + \delta]$ de cada imagen en sección X_k , definido por un instante de principio de adquisición $t_k + \delta_0$ y un instante de fin de adquisición $t_k + \delta_0 + \delta$, proporcionando la diferencia la duración de adquisición δ . Se supone, para $0 \leq k < m$: $t_k \leq t_k + \delta_0 < t_k + \delta_0 + \delta \leq t_{k+1}$.

10 **[0198]** En el ejemplo descrito, el instante de principio de adquisición T_{m0} y la duración de adquisición T^m son los mismos para todas las imágenes en sección. Sin embargo, el procedimiento se extiende fácilmente al caso en que el instante de principio de adquisición T_{m0} y la duración de adquisición T^m varían según las imágenes en sección.

[0199] Durante la exposición, el nivel de luminosidad de cada punto del plano focal evoluciona progresivamente añadiendo el nivel de luminosidad de los puntos del recorrido que atraviesa.

15 **[0200]** Siendo la posición del objeto O en cada instante t_k conocida (o estimada), la etapa 400 de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 452 de determinación de la posición continua del objeto O , en función del tiempo, entre los instantes sucesivos t_k y t_{k+1} , y más especialmente durante los intervalos de adquisición I_k .

20 **[0201]** Así, la etapa 452 de determinación de la posición continua del objeto O comprende una etapa 454 de determinación de una relación entre la posición $\Psi_{k,t}(u)$ en el instante $t_k + t$ (entre los instantes sucesivos t_k y t_{k+1}) de un punto del objeto, que se sitúa en la posición u en el instante t_k , y los parámetros de movimiento del objeto: velocidad angular τ , eje de rotación L y sucesión de translaciones de perturbación $T_1 \dots T_m$.

[0202] Puesto que la duración entre los instantes t_k y t_{k+1} es corta, se considera que el movimiento está aproximadamente compuesto por la rotación estable y una translación, fracción lineal (proporcional al tiempo) de la translación de perturbación entre los instantes t_k y t_{k+1} .

[0203] Así, la posición $\Psi_{k,t}(u)$ se determina mediante:

25
$$\Psi_{k,t}(u) = R_{\bar{a},\tau,t}(u - u_0) + u_0 + \frac{t}{t_{k+1} - t_k} T_{k+1}, \text{ pour } 0 \leq t \leq t_{k+1} - t_k,$$

con $T_{m+1} = 0$.

[0204] Se destacará que $\Psi_{k,0}(u) = u$ y $\Psi_{k,t_{k+1}-t_k}(u)$ es la posición del punto del objeto en el instante t_{k+1} partiendo de la posición u en el instante t_k .

30 **[0205]** La etapa 452 de determinación de la posición continua del objeto O comprende además una etapa 456 de determinación de una relación entre la posición $C_{k,t}(s)$ en el instante inicial t_0 del punto o del objeto, cuya posición en el instante $t_k + t$ está sobre el píxel s del plano de corte P , a partir de la función $\Psi_{k,t}$ precedente. Esta posición $C_{k,t}(s)$ se determina mediante:

$$C_{k,t}(s) = R_{\bar{a},\tau(t_k - t_0 + t)}^t (\pi_3 s - u_0 - \frac{t}{t_{k+1} - t_k} T_{k+1} - R_{\bar{a},\tau,t} \bar{T}_k) + u_0.$$

35 **[0206]** La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 460 de elección del operador Op como siendo la integral sobre el intervalo de adquisición I_k de la convolución de la función de representación tridimensional V_β con la función de difusión del punto fR .

[0207] La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 462 de cálculo, para cada punto u del conjunto Ω , de una estimación $X(u)$ del valor de este punto u , a partir del operador Op . La estimación $X(u)$ se determina mediante:

40
$$\tilde{X}(u) = \int_{t=\delta_0}^{\delta_0+\delta} V_\beta * f_{R_{\bar{a},\tau(t_k - t_0 + t)}}(C_{k,t}(s)) dt,$$

donde s y la imagen en sección X_k (del instante de toma t_k) son respectivamente el píxel y la imagen de origen del punto u ,

[0208] Igual que para la segunda variante, la etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 464 de elección de la función de representación tridimensional V_β como descomposición en funciones radiales de base ϕ :

$$\forall u \in D, V_\beta(u) = \sum_{w \in W} \phi(u-w) \beta(w),$$

5 con W el conjunto de los nodos en el volumen D .

[0209] La etapa 400 de determinación de la representación tridimensional V del objeto O comprende además una etapa 466 de determinación de los coeficientes $\beta(w)$.

[0210] Más concretamente, sustituyendo V_β por su descomposición en funciones radiales de base, se obtiene, para cada punto u del conjunto Ω :

$$\tilde{X}(u) = \sum_{w \in W} \int_{t=\delta_0}^{\delta_0+\delta} \gamma(\pi_3 s + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_0 + t)}(u_0 - w) - \frac{t}{t_{k+1} - t_k} T_{k+1} - R_{\bar{a}, \tau t} \bar{T}_k - u_0) dt \beta(w),$$

10 donde s y la imagen en sección X_k (del instante de toma t_k) son respectivamente el píxel y la imagen de origen del punto u , y $\gamma = \phi * f$.

[0211] Se indica

$$\gamma_{k,w}(x) = \int_{t=\delta_0}^{\delta_0+\delta} \gamma(x + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_0 + t)}(u_0 - w) - \frac{t}{t_{k+1} - t_k} T_{k+1} - R_{\bar{a}, \tau t} \bar{T}_k - u_0) dt.$$

15 **[0212]** Por lo tanto se obtiene, para cada punto u del conjunto Ω :

$$\tilde{X}(u) = \sum_{w \in W} \gamma_{k,w}(\pi_3 s) \beta(w),$$

donde s y la imagen en sección X_k (del instante de toma t_k) son respectivamente el píxel y la imagen de origen del punto u .

20 **[0213]** Igual que para la segunda variante $\gamma = \phi * f$ se calcula preferentemente analíticamente o numéricamente mediante cálculos aproximados.

[0214] Así, la etapa 466 de determinación de los coeficientes $\beta(w)$ comprende una etapa de cálculo de los $\gamma_{k,w}$.

[0215] Si el cálculo analítico de $\gamma_{k,w}$ es farragoso o imposible, $\gamma_{k,w}$ se aproxima mediante una suma discreta, por ejemplo la suma de Riemann:

$$\gamma_{k,w}(x) \approx \frac{\delta}{J} \sum_{j=0}^{J-1} \gamma(x + R_{\bar{a}, \tau(t_k - t_0 + \delta_0 + \delta \frac{j}{J})}(u_0 - w) - \frac{\delta_0 + \delta \frac{j}{J}}{t_{k+1} - t_k} T_{k+1} - R_{\bar{a}, \tau(\delta_0 + \delta \frac{j}{J})} \bar{T}_k - u_0),$$

25 con J un número entero bastante grande, por ejemplo $J \approx 20$.

30 **[0216]** Más generalmente, en el caso en que se utilizan varias secuencias $S_l, l = 1, \dots, l$, siendo las rotaciones Q_l y las translaciones h_l conocidas, la etapa 466 de determinación de los coeficientes $\beta(w)$ comprende una etapa consistente en sensiblemente colocar todas las posiciones O_l de las representaciones del objeto O en una misma posición de referencia. Se recuerda que escogiendo por ejemplo la primera secuencia como la secuencia de referencia, $Q_1 = I_3$ (con I_3 la matriz identidad 3- por-3) y $h_1 = 0$, se puede descomponer en la referencia de la secuencia de referencia, para cada punto u del conjunto Ω , la estimación $X(u)$ del valor de este punto u en una combinación lineal asociada a los coeficientes $\beta(w)$:

$$\tilde{X}(u) = \sum_{w \in W} \gamma'_{k,w}(\pi_3 s) \beta(w),$$

con

$$\gamma'_{k,w}(x) = \int_{t=\delta_0}^{\delta_0+\delta} \gamma(R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_0 + t)} Q'_l R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_0 + t)}^t (x - u'_0 - \frac{t}{t'_{k+1} - t'_k} T'_{k+1} - R_{\bar{a}_l, \tau_l} \bar{T}'_k) + R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_0 + t)} (Q'_l (u'_0 - h_l) - w)) dt$$

donde s , la imagen en sección X'_k (del instante de toma t'_k) y S_l son respectivamente el píxel, la imagen y

5 la secuencia de origen del punto u, τ_l, a_l, u'_0 y T'_k son los parámetros del movimiento para la secuencia S_l ,
 $T'_{m_l+1} = 0$ y $\gamma = \phi * f$.

[0217] Así, en este caso, la etapa 466 comprende una etapa de cálculo de los $\gamma'_{k,w}$.

[0218] Como $\gamma_{k,w}(x)$, $\gamma'_{k,w}(x)$ también puede ser aproximada por una suma discreta (suma de Riemann por ejemplo).

10 [0219] Preferentemente, D se escoge suficientemente grande para que D contenga todos los puntos u de posición

$$Q'_l R_{\bar{a}_l, \tau_l(t'_k - t'_0)}^t (\pi_3 s - u'_0 - \bar{T}'_k) + Q'_l (u'_0 - h_l),$$

para cada píxel s de cada imagen en sección de cada secuencia S_l , con $l = 1 \dots L$. Los parámetros β de la función de representación tridimensional V_β se determinan minimizando la función de coste cuadrática siguiente:

$$E(\beta) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{m_l} \sum_s \left(X'_k(s) - \sum_{w \in W} \gamma'_{k,w}(\pi_3 s) \beta(w) \right)^2 + \lambda \beta' A \beta,$$

15 donde A es una matriz semi definida positiva, $\beta' A \beta$ mide la irregularidad de los coeficientes $\beta(w)$, por ejemplo A se escoge de la misma manera que anteriormente, $\lambda > 0$ es el parámetro de compromiso entre la adecuación de la función de representación tridimensional y la regularidad de los coeficientes. $E(\beta)$ se escribe en la forma matricial siguiente:

$$E(\beta) = \|y - K\beta\|^2 + \lambda \beta' A \beta,$$

20 donde β es el vector de los coeficientes, los elementos del vector y son las $X'_k(s)$ y la matriz K está compuesta por los elementos $\gamma'_{k,w}(\pi_3 s)$.

[0220] El resultado de minimización de $E(\beta)$ es la solución del sistema lineal siguiente:

$$(K'K + \lambda A)\beta = K'y$$

[0221] Para calcular los coeficientes $\beta(w)$, se pueden utilizar los procedimientos de optimización numéricos, por ejemplo el procedimiento de gradiente conjugado, o el procedimiento de optimización por bloque presentado anteriormente.

5 **Ajuste de la posición del plano de corte**

[0222] Es deseable que la mayor parte del objeto O pase en el plano de corte P . En una configuración óptima, el eje de rotación L está sensiblemente contenido en el plano de corte P . Así, en un modo de realización de la invención, el procedimiento comprende una etapa 53, intercalada entre las etapas 52 y 54, de ajuste de la posición del plano de corte P con respecto al eje de rotación L . Por supuesto, la etapa de ajuste también puede realizarse independientemente de las etapas 50, 52, 54 y 56.

[0223] Se prevén tres maneras de realizar la etapa 53 de ajuste, con la finalidad de obtener sensiblemente la configuración óptima, o bien, en su defecto, una configuración conveniente.

Primera variante de ajuste

[0224] En una primera variante, la etapa 53 de ajuste comprende el desplazamiento y la inclinación del microscopio óptico con el fin de colocar el eje de rotación L en el plano focal P . Esta variante permite obtener la configuración óptima.

[0225] Esta variante comprende la determinación del eje de rotación L de la misma manera que en las etapas 54 y 56.

Segunda variante de ajuste

[0226] En una segunda variante, la etapa 53 de ajuste comprende la modificación del campo eléctrico o electromagnético con el fin de colocar el eje de rotación L en el plano focal P . Esta variante permite también obtener la configuración óptima.

[0227] Esta variante comprende la determinación del eje de rotación L de la misma manera que en las etapas 54 y 56.

Tercera variante de ajuste

[0228] Con referencia a la figura 16, en una tercera variante, la etapa 53 de ajuste comprende el desplazamiento del plano focal P según la dirección Z (la dirección perpendicular al plano focal P) con la finalidad de que el plano focal P corte el objeto O sensiblemente por el medio del objeto. El desplazamiento del plano focal P se obtiene trasladando el microscopio óptico 12, y/o actuando sobre la lente 14 para cambiar la distancia focal.

[0229] En el ejemplo descrito, el medio del objeto O se toma como siendo el baricentro del objeto O .

[0230] Así, con referencia a la figura 16, la etapa 53 de ajuste comprende ante todo una etapa 53A de toma de una secuencia de imágenes en sección $X_0...X_m$, luego una etapa 53B de determinación de la velocidad angular τ , del eje de rotación L y de la sucesión de translaciones de perturbación $T_1...T_m$. La etapa 53B se realiza de la misma manera que la etapa 56.

[0231] La etapa 53 de ajuste comprende además una etapa 53C de determinación del conjunto de puntos Ω de la misma manera que en la etapa 404.

[0232] La etapa 53 de ajuste comprende además una etapa 53D de determinación de un baricentro b de los puntos luminosos del conjunto Ω . El baricentro b se determina preferentemente mediante la relación:

$$b = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_s 1_{X_i(s) > \alpha} C_k(s)}{\sum_{i=0}^n \sum_s 1_{X_i(s) > \alpha}}$$

con $X_0...X_n$, $n \leq m$, la parte de las imágenes en secciones $X_0...X_m$, que han sido adquiridas durante el intervalo de tiempo en el transcurso del cual el objeto realiza un número máximo de vueltas completas girando alrededor del eje de rotación, $1_{B>A} = 1$ cuando B es superior a A y 0 sino, y α es por ejemplo el q -cuantil de nivel de gris de las imágenes en sección $X_0...X_n$ (lo cual significa que la proporción de los píxeles que tienen un nivel de gris inferior o igual a α es sensiblemente igual a q). Generalmente, q vale entre 60% y 95%.

[0233] La etapa 53 de ajuste comprende además una etapa 53E de cálculo de la proyección b del baricentro b sobre el eje de rotación L .

[0234] La etapa 53 de ajuste comprende además una etapa 53F de ajuste del sistema de formación de imágenes 10 para llevar el plano de corte P sobre la proyección b del baricentro b .

5 **Anexo:**

[0235] Sea ϕ una función radial de base. Para cualquier matriz de rotación R , $\phi(Rx)=\phi(x)$. Se tiene entonces:

$$\begin{aligned}\phi^* f_R(x) &= \int \phi(x-u) f(Ru) du \\ &= \int \phi(x-R'y) f(y) dy \\ &= \int \phi(Rx-y) f(y) dy \\ &= \phi^* f(Rx).\end{aligned}$$

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación de una representación tridimensional (V) de un objeto (O) a partir de una secuencia de imágenes en sección ($X_0...X_m$) del objeto (O) en un plano de corte (P), habiendo sido cada imagen en sección ($X_0...X_n$) tomada en un instante de toma de vista ($t_0...t_m$) respectivo, del tipo que comprende:

5 - para cada imagen en sección (X_k), la determinación (200) de la posición del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) en el instante (t_k) de toma de la imagen en sección (X_k),

- la determinación (400) de una representación tridimensional (V) del objeto (O) a partir de las imágenes en sección ($X_0...X_m$) y de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) en cada instante de toma de vista ($t_0...t_m$), procedimiento en el cual las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) se determinan
10 utilizando las imágenes en sección ($X_0...X_m$),

- estando el procedimiento **caracterizado por el hecho de que**, teniendo el objeto (O) un movimiento con respecto al plano de corte (P) compuesto, por un lado, por un movimiento regular definido por unos parámetros de movimiento regular (L, τ) y, por otro lado, por una sucesión de desplazamientos de perturbaciones ($T_1...T_m$) del objeto entre el instante (t_k) de toma de una imagen en sección (X_k) y el instante (t_{k+1}) de toma de la siguiente (X_{k+1}),
15 siendo los desplazamientos de perturbaciones ($T_1...T_m$) translaciones de perturbación, de dirección y de valor variables, la determinación (200) de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende la determinación (300) de la sucesión de desplazamientos de perturbación ($T_1...T_m$) utilizando las imágenes en sección ($X_0...X_m$), y por el hecho de que, el movimiento regular siendo un movimiento de rotación definido por los parámetros de movimiento siguientes: un eje de rotación fijo (L) y una velocidad angular (τ) constante, la determinación (200) de
20 las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende la determinación (210, 300) de al menos una parte de los parámetros de movimiento regular (L, τ) utilizando las imágenes en sección ($X_0...X_m$).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende la determinación (210) de la velocidad angular en valor absoluto ($|\tau|$) a partir de la determinación (212) de un periodo de revolución (p) de modo que dos
25 imágenes en sección ($X_k, X_{k'}$) tomadas en unos instantes respectivos ($t_k, t_{k'}$) separados uno del otro de un tiempo sensiblemente igual a un múltiplo, no nulo, del periodo (p), sean sensiblemente similares.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación (212) del periodo (p) comprende:

- la determinación (214) de un grupo inicial de periodos candidatos ($p_1...P_n$),

30 - la selección (240), entre los periodos candidatos ($p_1...p_n$), para cada imagen en sección (X_k), de un primer subconjunto ($p_{j(k,1)}, \dots, p_{j(k,e)}$) que agrupa los periodos candidatos $p_1...p_n$ que tienen los niveles de similitud periódica más elevados, caracterizando el nivel de similitud periódica ($sim(X_k, p_j)$), para cada periodo candidato (p_j), el nivel de similitud de la imagen en sección (X_k) con imágenes en sección sensiblemente periódicas ($X_{k'}$), para el periodo candidato (p_j),

35 - la determinación (248) de una ley de probabilidad de que un periodo candidato sea seleccionado, teniendo la ley de probabilidad el periodo (p) como parámetro,

- la selección del periodo (p) entre los periodos candidatos ($p_1...p_n$) del grupo inicial, como siendo aquella que maximiza la verosimilitud según la ley de probabilidad, conociendo los periodos candidatos seleccionados.

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación (200) de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende, siendo la
40 velocidad angular en valor absoluto ($|\tau|$) conocida:

- para cada imagen en sección (X_k), la determinación (304) de imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecinas de la imagen en sección (X_k),

45 - para cada imagen en sección (X_k), el cálculo (308) de una proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) de la imagen en sección (X_k) sobre un plano soporte de cada imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecina, estando la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación,

- la comparación (310) del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina ($X_{k'}$) sobre la cual la proyección ha sido realizada,

50 - la determinación (312) del eje de rotación (L) y de la sucesión de translaciones de perturbación ($T_1...T_m$) cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación (310).

- 5 **5.** Procedimiento según la reivindicación 4, **caracterizado además por el hecho de que** la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) de la imagen en sección (X_k) se realiza mediante el cálculo de una transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) de la imagen en pareja (X_k), teniendo la transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) una componente de transformación lineal ($Q_{k,k'}(a, \tau)$) y una componente de translación ($v_{k,k'}(L, \tau, T_1...T_m)$) funciones de, respectivamente, por un lado, la dirección (a) del valor de eje de rotación y la velocidad de rotación (τ) y, por otro lado, el valor de eje de rotación (L), la velocidad de rotación (τ) y el valor de sucesión de translaciones de perturbación ($T_1...T_m$).
- 10 **6.** Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación (200) de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende, siendo la velocidad angular en valor absoluto ($|\tau|$) conocida:
- para cada imagen en sección (X_k), la determinación (316) de imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecinas de la imagen en sección (X_k),
 - para cada imagen en sección (X_k), el cálculo (320) de una proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) de la imagen en sección (X_k) sobre un plano soporte ($X_{k'}$) de cada imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecina, estando la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación, realizándose la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) mediante el cálculo de una transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) de la imagen en sección (X_k), teniendo la transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) una componente de transformación lineal ($Q_{k,k'}(a, \tau)$) y una componente de translación ($v_{k,k'}$), siendo la componente de transformación lineal ($Q_{k,k'}(a, \tau)$) función de la dirección (a) del valor de eje de rotación y la velocidad de rotación (τ),
 - la comparación (322) del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina ($X_{k'}$), sobre la cual la proyección ha sido realizada,
 - la determinación (324) de la dirección del eje de rotación (L) y de los componentes de translación ($v_{k,k'}$), llamados de referencia, cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación (322).
- 25 **7.** Procedimiento según la reivindicación 6, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación de una estimación de la posición del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende, habiendo sido determinados la dirección (a) del eje de rotación (L) y los componentes de translación de referencia ($v_{k,k'}$):
- la expresión de componentes de translación ($v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$) de transformación de afinidad en función de un valor de sucesión de translaciones de perturbación ($T_1...T_m$) y de un valor de punto de paso (u_0) del eje de rotación (L),
 - la determinación de la sucesión de translaciones de perturbación ($T_1...T_m$) y de un punto de paso (u_0) del eje de rotación (L) cuyos valores dan componentes de translación ($v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1...T_m)$) cercanos de los componentes de translación de referencia ($v_{k,k'}$).
- 35 **8.** Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende la determinación del eje de rotación (L).
- 9.** Procedimiento según la reivindicación 8, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación del eje de rotación (L) comprende la determinación de una proyección (L_{XY}) del eje de rotación (L) sobre el plano de corte (P), a partir de las imágenes en sección ($X_0...X_m$).
- 40 **10.** Procedimiento según la reivindicación 8 o 9, **caracterizado además por el hecho de que**, comprendiendo cada imagen en sección (X_k) una rejilla de píxeles, idéntica para todas las imágenes en sección ($X_0...X_m$), comprende:
- para cada píxel (s) de la rejilla, la determinación (338, 340) del histograma de los valores que toma este píxel (s) en al menos una parte de la secuencia de imágenes en sección ($X_0...X_m$) y del histograma de los valores que toma el punto simétrico al píxel con respecto a un valor de proyección (L_{XY}) del eje de rotación (L),
 - la determinación (344) de la proyección (L_{XY}) del eje de rotación (L) cuyo valor da histogramas cercanos entre cada píxel y su punto simétrico.
- 45 **11.** Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, **caracterizado además por el hecho de que** comprende:
- la determinación (348), para al menos un píxel (s) de la rejilla, de un tiempo ($t(s)$) de simetrización, necesario a un punto del objeto para desplazarse desde este píxel (s) hasta el punto simétrico ($L_{XY}(s)$) con respecto a la proyección (L_{XY}) del eje de rotación (L),
- 50

- la determinación (356) de un ángulo entre el eje de rotación (L) y su proyección (L_{xy}) sobre el plano de corte (P), a partir del o de los tiempo de simetrización ($t(s)$).

5 **12.** Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, **caracterizado además por el hecho de que** la determinación (200) de las posiciones del objeto (O) con respecto al plano de corte (P) comprende, siendo la velocidad angular (τ) y el eje de rotación (L) conocidos:

- para cada imagen en sección (X_k), la determinación de imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecinas de la imagen en sección (X_k),

10 - para cada imagen en sección (x_k), el cálculo de una proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) de la imagen en sección (X_k) sobre un plano soporte ($X_{k'}$) de cada imagen en sección ($X_{k'}$) espacialmente vecinas, estando la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) expresada en función de un valor de eje de rotación y de un valor de sucesión de translaciones de perturbación, realizándose la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) mediante el cálculo de una transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) de la imagen en sección (X_k), teniendo la transformación de afinidad ($Aff(Q_{k,k'}, v_{k,k'}, X_k)$) una componente de transformación lineal ($Q_{k,k'}(a, \tau)$) y una componente de translación ($v_{k,k'}$), siendo la componente de transformación lineal ($Q_{k,k'}(a, \tau)$) función de la dirección (a) del valor de eje de rotación y la velocidad angular de rotación (τ),

- la comparación del valor de cada uno de un conjunto de píxeles de la proyección ortogonal ($F_{k,k'}(X_k)$) con el valor de este píxel de la imagen en sección espacialmente vecina ($X_{k'}$) sobre la cual la proyección ha sido realizada,

- la determinación, siendo el eje de rotación (L) conocido, de los componentes de translación ($v_{k,k'}$) llamados de referencia, cuyos valores dan valores de píxeles cercanos en el transcurso de la comparación (322),

20 - la expresión de componentes de translación ($v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1 \dots T_m)$) de transformación de afinidad en función de un valor de sucesión de translaciones de perturbación ($T_1 \dots T_m$) y de un valor de punto de paso (u_0) del eje de rotación (L),

25 - la determinación de la sucesión de translaciones de perturbación ($T_1 \dots T_m$) y de un punto de paso (u_0) del eje de rotación (L) cuyos valores dan componentes de translación ($v_{k,k'}(u_0, a, \tau, T_1 \dots T_m)$) cercanos de los componentes de translaciones de referencia ($v_{k,k'}$).

13. Producto de programa de ordenador, **caracterizado por el hecho de que** está concebido para, cuando se ejecuta en un ordenador informático, llevar a cabo las etapas de un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

30 **14.** Procedimiento de análisis de un objeto (O) para determinar de este una representación tridimensional (V), **caracterizado por el hecho de que** comprende:

- la introducción (50) del objeto (O) en un sistema de formación de imágenes (10) que define un plano focal que forma un plano de corte (P),

- la configuración (52) del sistema de formación de imágenes (10) para hacer girar el objeto (O) alrededor de un eje de rotación fijo (L) y con una velocidad angular fija (τ),

35 - la toma de una secuencia de imágenes en sección ($X_0 \dots X_m$) del objeto (O),

- la determinación de una representación tridimensional (V) del objeto (O) a partir de la secuencia de imágenes en sección ($X_0 \dots X_m$), utilizando un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

15. Procedimiento según la reivindicación 14, **caracterizado además por el hecho de que** comprende:

- la toma (53A) de una secuencia de imágenes en sección del objeto (O), llamadas imágenes en sección de ajuste,

40 - la determinación (53B) del eje de rotación (L) del objeto (O), a partir de las imágenes en sección de ajuste.

16. Procedimiento según la reivindicación 15, **caracterizado además por el hecho de que** comprende el ajuste (53) del sistema de formación de imágenes (10) para desplazar (53F) el plano de corte (P) con respecto al objeto (O) de manera que el plano de corte (P) pasa por un medio (b) del objeto (O).

45 **17.** Procedimiento según la reivindicación 16, **caracterizado además por el hecho de que** el ajuste (53) del sistema de formación de imágenes (10) comprende la determinación (53D) de un baricentro (b) del objeto, **y por el hecho de que** el medio del objeto (O) es la proyección del baricentro (b) sobre el eje de rotación (L).

18. Sistema de formación de imágenes **caracterizado por el hecho de que** comprende:

- medios (12) que permiten obtener imágenes en un plano focal P ,

- un receptáculo (18) para recibir un objeto (O),
- medios (34, 30) para poner el objeto (O) en movimiento,
- medios (36) para recibir imágenes en sección tomadas en el plano focal, adaptados para llevar a cabo un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

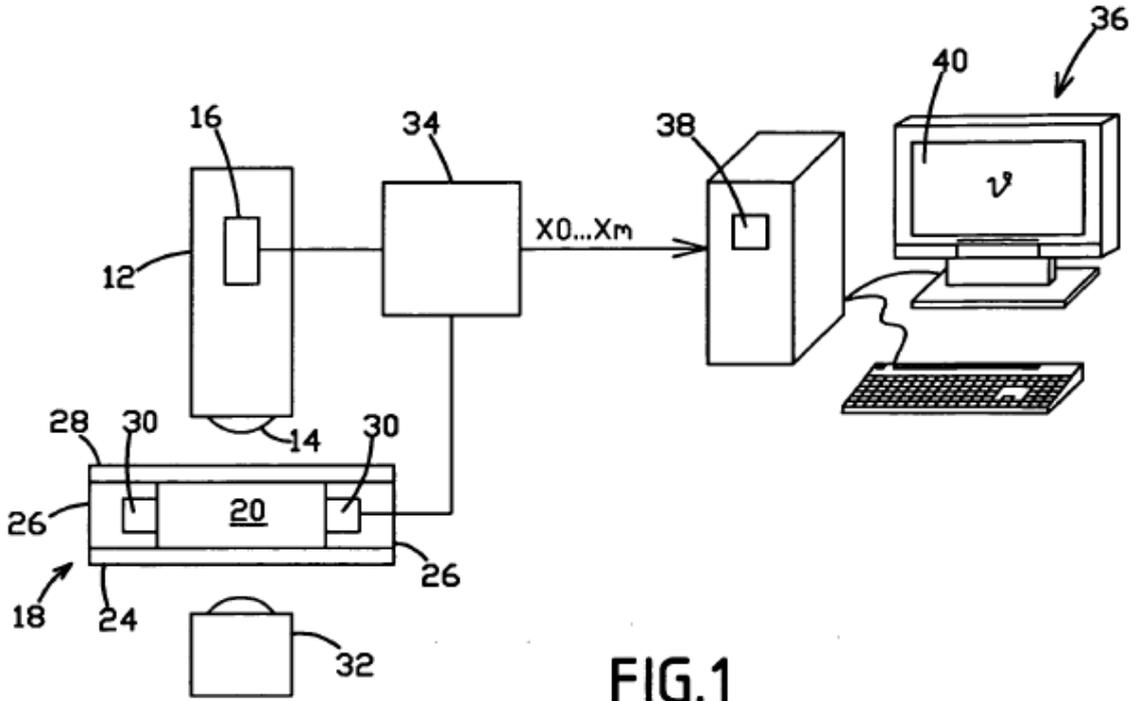


FIG. 1

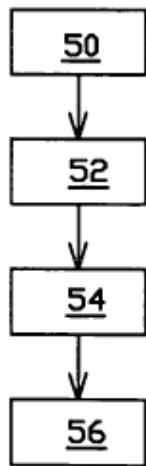


FIG. 2

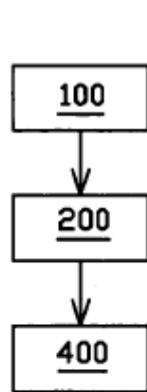


FIG. 3

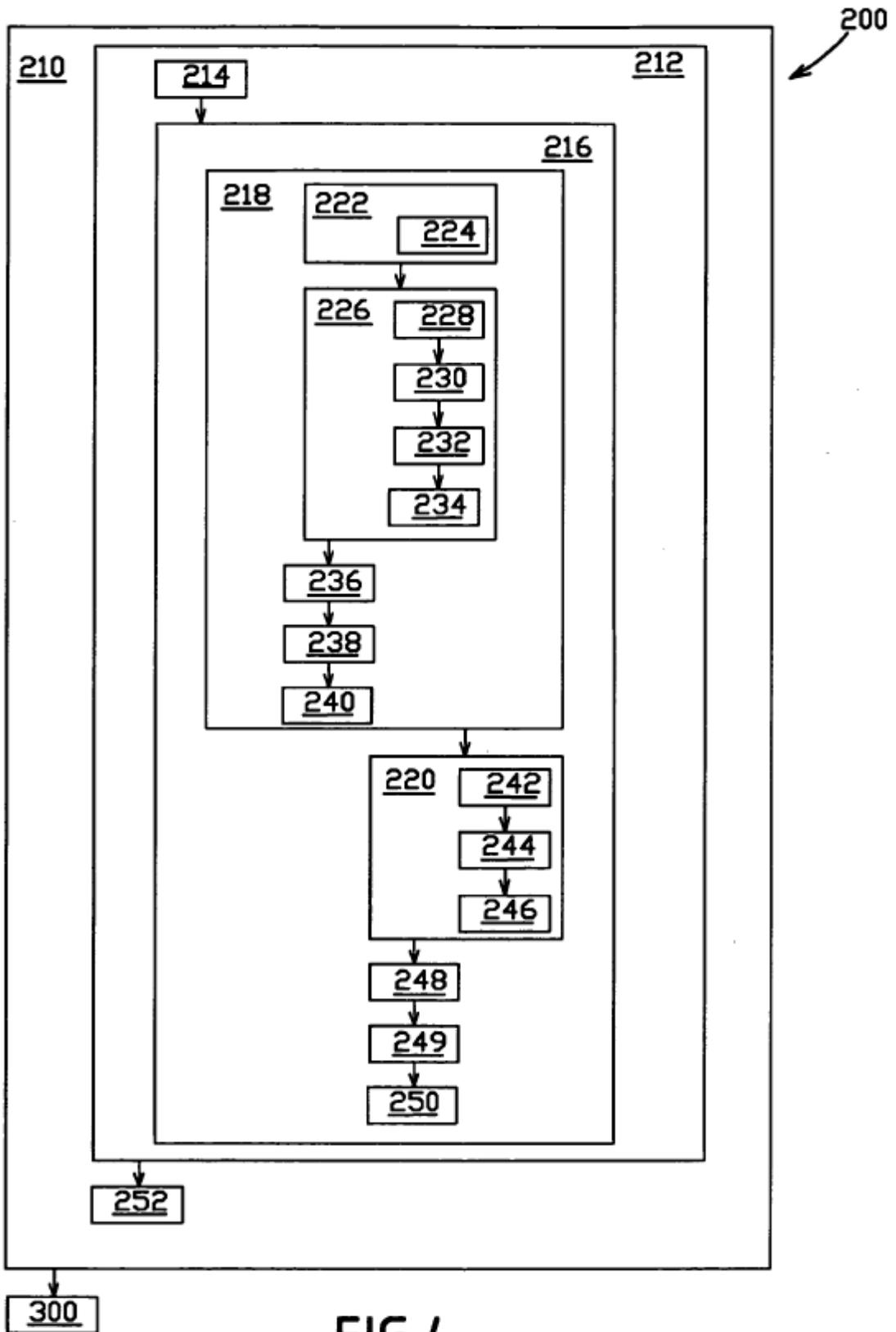


FIG. 4

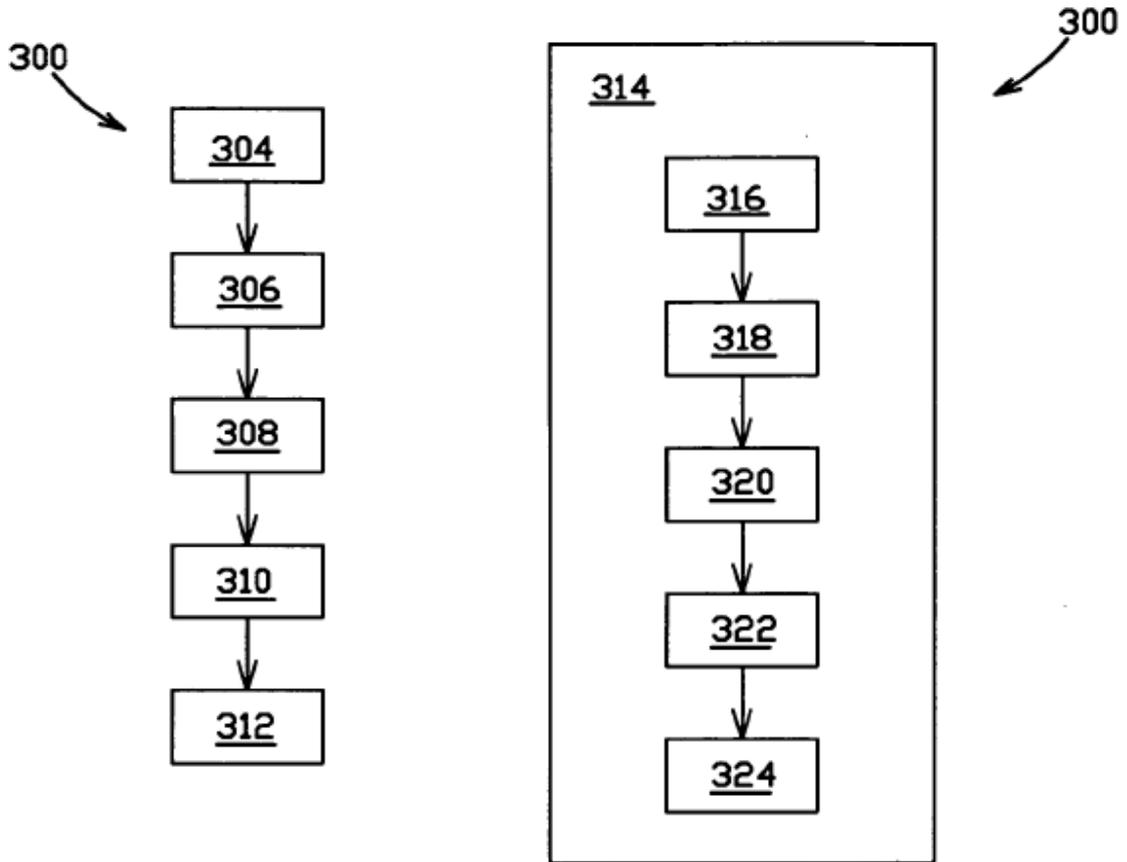


FIG.5

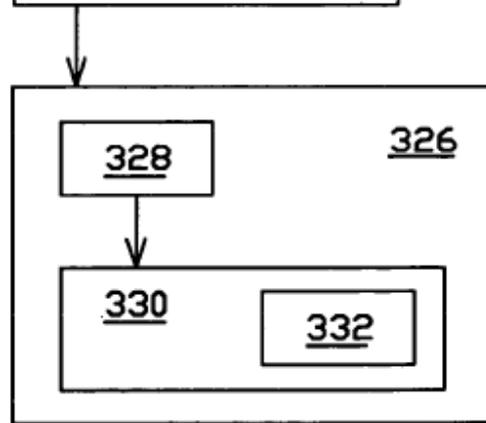


FIG.7

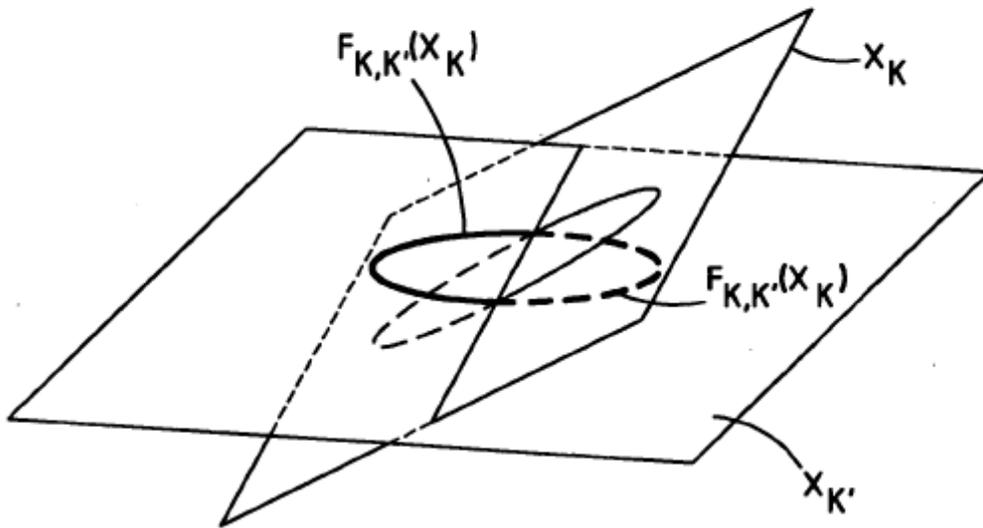


FIG.6

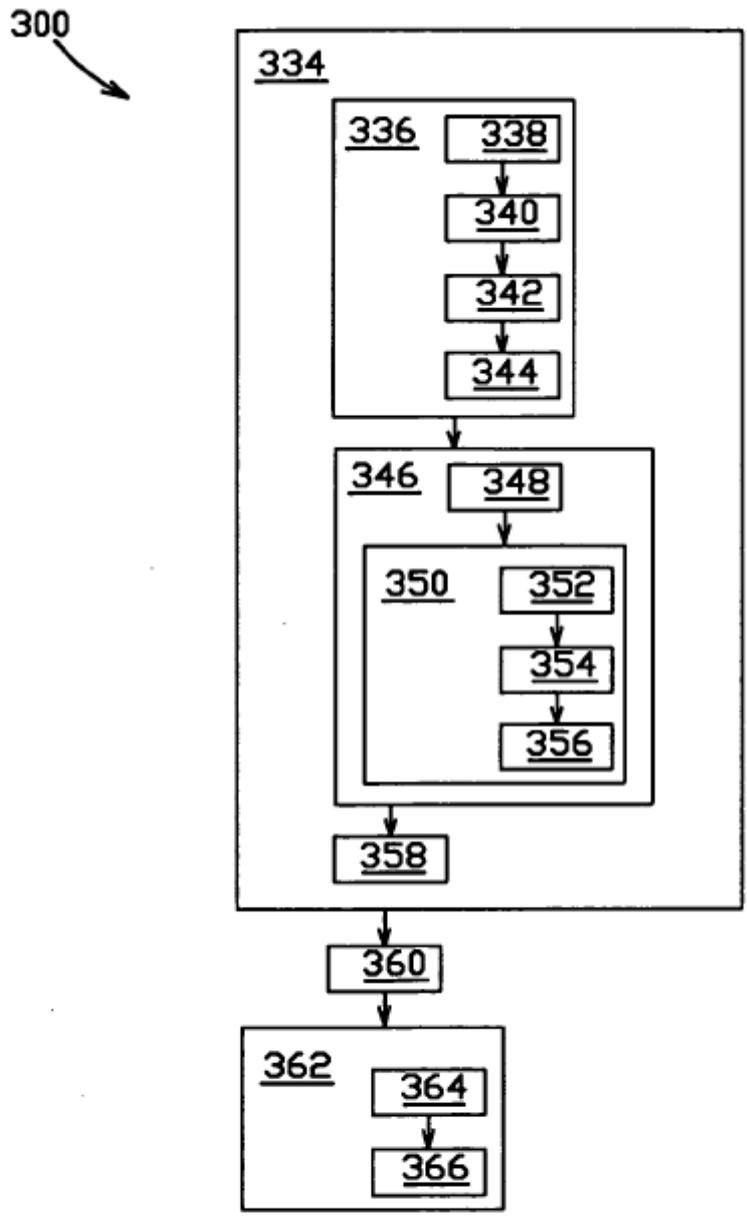


FIG.8

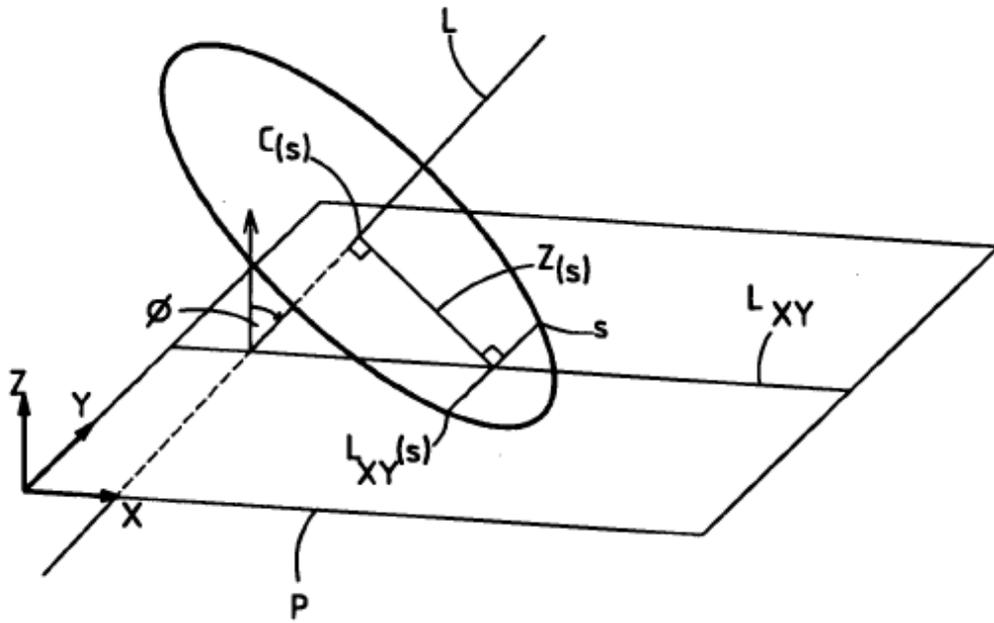


FIG.9

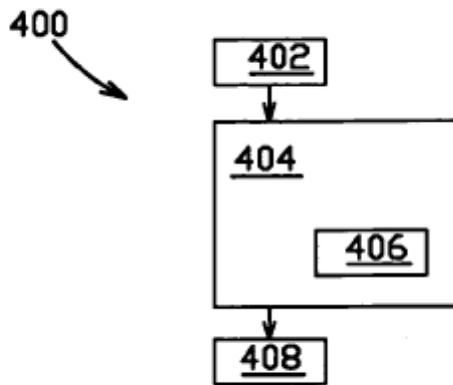


FIG.10

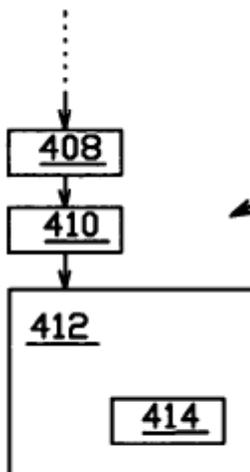


FIG.11

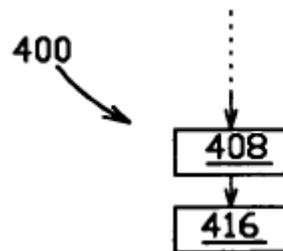


FIG.12

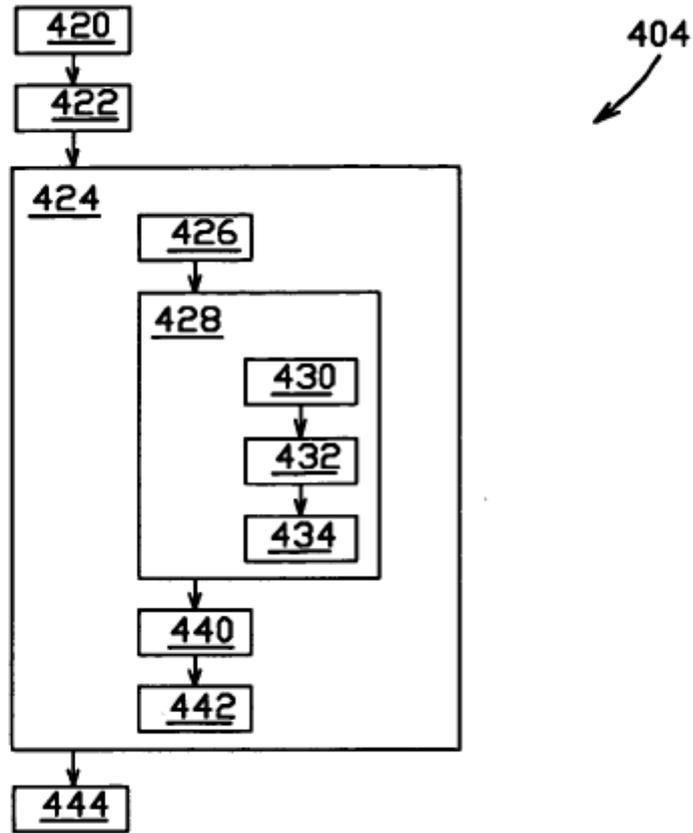


FIG.13

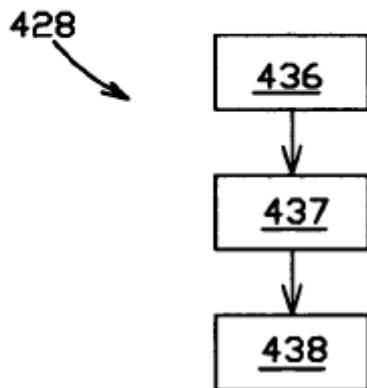


FIG.14

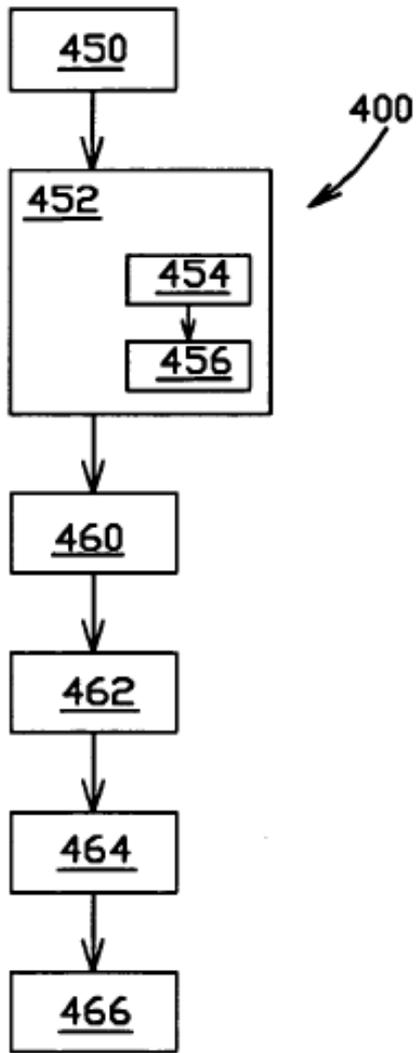


FIG.15

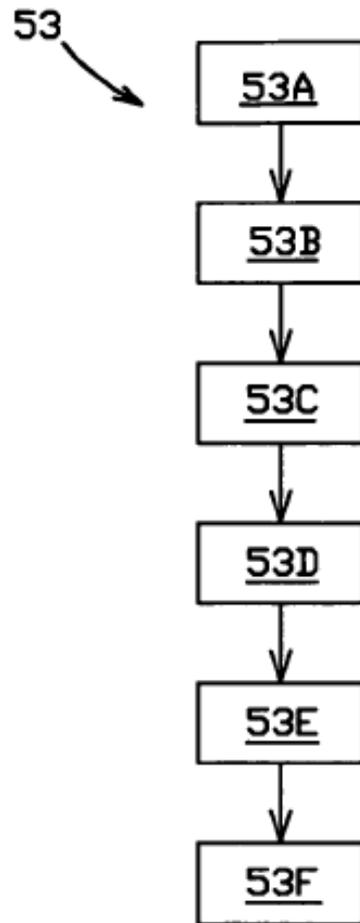


FIG.16