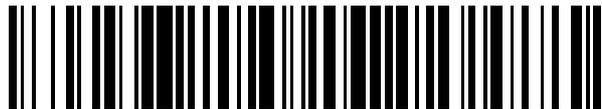


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 687 125**

51 Int. Cl.:

**G06T 5/00**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.01.2012 PCT/FR2012/050055**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.08.2012 WO12101355**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.01.2012 E 12702599 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.06.2018 EP 2668635**

54 Título: **Tratamiento de datos de imágenes que incluyen efectos de turbulencias en un medio líquido**

30 Prioridad:

**28.01.2011 FR 1150655**

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

**23.10.2018**

73 Titular/es:

**ELECTRICITÉ DE FRANCE (100.0%)  
22-30 Avenue de Wagram  
75008 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**PAUL, NICOLAS y  
DE CHILLAZ, ANTOINE**

74 Agente/Representante:

**VEIGA SERRANO, Mikel**

**ES 2 687 125 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**

Tratamiento de datos de imágenes que incluyen efectos de turbulencias en un medio líquido

**5 Sector de la técnica**

La presente invención se refiere al tratamiento de imágenes digitales.

10 Está dirigida, en particular, al tratamiento de imágenes sucesivas (típicamente de una secuencia filmada). Estas imágenes se adquieren con una cámara y, en particular, la cámara está sumergida en un líquido que presenta turbulencias. Por ejemplo, estas turbulencias se pueden deber a faltas de homogeneidad en el medio líquido, tales como diferencias locales de temperatura. Tales turbulencias provocan un efecto de desplazamiento aparente de los píxeles de las imágenes. Por ejemplo, una diferencia local de temperatura en una región que corresponde a un borde de imagen conlleva una turbulencia cuyo efecto sobre las imágenes filmadas se manifiesta mediante una perturbación de los píxeles en este borde de imagen con un desplazamiento aparente (con respecto a una posición de origen) de algunos de estos píxeles, siendo este desplazamiento variable a lo largo del tiempo (de manera aleatoria).

15 La naturaleza aleatoria de estas variaciones implica una dificultad (incluso una imposibilidad) en el tratamiento de las imágenes para suprimir los efectos de las turbulencias.

**Estado de la técnica**

20 La patente US2009/0252430 divulga la corrección del ruido en las imágenes submarinas por deconvolución, sin tener en cuenta las turbulencias.

El documento "A simple underwater imaging model", Weilin Hou, Optics letters, vol. 34, n.º 17, pp. 2688-2690 divulga la modelización de las turbulencias en la formación de imágenes submarinas.

**30 Objeto de la invención**

La presente invención viene a mejorar la situación.

35 Propone para tal efecto un procedimiento de tratamiento de datos de imágenes del tipo mencionado anteriormente, que incluye, en particular:

- una modelización del efecto de las turbulencias en los píxeles de las imágenes, y
- una deconvolución por dicha modelización de una imagen promediada en el tiempo.

40 Ventajosamente, en efecto, se ha observado que era posible modelizar perfectamente el efecto de las turbulencias, pero para una duración relativamente larga. De este modo, el hecho de promediar los mismos píxeles de una imagen a lo largo del tiempo permite "aplastar" el efecto de las turbulencias. Se obtiene una imagen media, borrosa. Par volver esta imagen nítida, se le aplica una deconvolución mediante un modelo que representa unas turbulencias.

45 Por supuesto, se supone que la escena que filma la cámara es fija, si bien un modo de realización, que se expone más adelante en la presente descripción, expone el caso de una cámara en traslación con respecto a una escena fija.

50 En una realización ventajosa, la antedicha modelización de las turbulencias incluye la estimación de un modelo  $h(\mathbf{u})$  de densidad de probabilidad de un vector de desplazamiento  $\mathbf{u}$  relativo al efecto de las turbulencias. Se ha observado, en particular, que, de manera particularmente ventajosa, una modelización probabilística del efecto de las turbulencias en los píxeles de las imágenes permite responder perfectamente al problema de modelizar unas turbulencias en principio aleatorias.

55 Un ejemplo de modelo ventajoso es del tipo disminución exponencial y puede expresarse en función del vector  $\mathbf{u}$ , mediante una relación de tipo:

$$h_{\sigma}(\mathbf{u}) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{B\|\mathbf{u}\|}{\sigma}\right\}$$

60 donde:

- $\sigma$  representa la desviación típica de la norma del vector  $\mathbf{u}$ ,

- A y B son unas constantes reales positivas, tales como, por ejemplo,  $A=3/\pi$  y  $B=\sqrt{6}$ .

Son posibles otras realizaciones que se describirán más adelante.

- 5 En lo que respecta a la estimación de la imagen media a lo largo del tiempo, en una posible realización se prevé una media ponderada por unas potencias de un factor de olvido (denotado en lo sucesivo  $\alpha$ ), respectivamente decrecientes en función del tiempo.

10 La imagen media  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$ , estimada en el momento n para un píxel de coordenadas vectoriales  $\mathbf{x}$ , puede entonces venir dado por:

$$I_\alpha(\mathbf{x},n) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \sum_{k=0}^{n-1} \alpha^k I(\mathbf{x},n-k)$$

siendo el término  $\alpha$  un número real correspondiente al factor de olvido.

- 15 En la práctica, la imagen media a lo largo del tiempo puede estimarse mediante un filtrado temporal recursivo.

De este modo, una  $n$ ésima salida del filtro temporal, para el momento n, denotada  $I_f(\mathbf{x},n)$  y la imagen media  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$  están vinculadas por las relaciones:

20 
$$I_f(\mathbf{x},n) = \alpha I_f(\mathbf{x},n-1) + (1-\alpha)I(\mathbf{x},n)$$

$$I_\alpha(\mathbf{x},n) = \frac{1}{1-\alpha^n} I_f(\mathbf{x},n)$$

Los ensayos realizados han demostrado que el factor de olvido a resultaba más ventajoso siendo próximo a 1, permaneciendo inferior a 1. Un valor seleccionado igual a 0,99 ha dado buenos resultados.

- 25 En lo que respecta ahora a la deconvolución mediante la modelización, ventajosamente, se prevé la aplicación de un filtrado espacial, lineal, de expresión correspondiente a la modelización mencionada anteriormente.

Ventajosamente, el filtrado espacial puede ser de tipo Wiener, si bien son posibles otras realizaciones.

- 30 El filtro espacial viene dado, por ejemplo, en el rango espectral por una expresión de tipo:

$$W_\sigma(\mathbf{f}) = \frac{H_\sigma^*(\mathbf{f})}{\|H_\sigma(\mathbf{f})\|^2 + \frac{S_b(\mathbf{f})}{S_{nítida}(\mathbf{f})}}, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| \leq f_c$$

$$W_\sigma(\mathbf{f}) = 0, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| > f_c$$

35 donde:

- $\mathbf{f}$  es un vector bidimensional de dos frecuencias normalizadas tras la transformada de Fourier bidimensional,
- $f_c$  es una frecuencia de corte del filtro para eliminar eventuales repliegues espectrales,
- $S_b(\mathbf{f})$  y  $S_{nítida}(\mathbf{f})$  son respectivamente unas densidades espectrales de potencia de un ruido y de una imagen nítida a determinar, y
- $H_\sigma(\mathbf{f})$  es la transformada de Fourier bidimensional de la densidad de probabilidad del efecto de las turbulencias  $h(\mathbf{u})$ .

Una simplificación de esta expresión se reduce a considerar el filtro espacial según una relación de tipo:

45

$$W_{\sigma}(\mathbf{f}) = \frac{H_{\sigma}(\mathbf{f})}{H_{\sigma}^2(\mathbf{f}) + \text{RBS}}$$

donde el término RRS se expresa en función de parámetros seleccionados de manera que el término RRS esté comprendido entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$ .

5

Con una relación del tipo mencionado anteriormente:

$$h_{\sigma}(\mathbf{u}) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{B\|\mathbf{u}\|}{\sigma}\right\},$$

la transformada de Fourier bidimensional  $H_{\sigma}(\mathbf{f})$  de la densidad de probabilidad del efecto de las turbulencias  $h_{\sigma}(\mathbf{u})$ , viene dada por:

10

$$H_{\sigma}(\mathbf{f}) = \left(1 + C(\sigma\|\mathbf{f}\|)^2\right)^{\frac{3}{2}}$$

donde C es una constante real positiva y  $\sigma$  es un real positivo contado en número de píxeles.

15

Se pueden retomar los valores de las constantes A y B dados anteriormente y definir completamente la transformada de Fourier bidimensional  $H_{\sigma}(\mathbf{f})$ , la cual viene entonces dada por:

$$H_{\sigma}(\mathbf{f}) = \left(1 + \frac{2}{3}(\pi\sigma\|\mathbf{f}\|)^2\right)^{\frac{3}{2}}$$

20

En particular, los ensayos realizados han demostrado que resulta ventajoso prever el término  $\sigma$  entre 0 y 30 píxeles.

Como se ha anunciado anteriormente, la presente invención prevé un modo de realización en el que la cámara puede desplazarse en traslación con relación a una escena fija. En este caso, se puede conservar el tratamiento presentado antes tomando, no obstante, la precaución de aplicar un reajuste de píxeles de una imagen en un momento n-1 en la imagen siguiente al momento n, teniendo en cuenta entonces una velocidad de desplazamiento de la cámara.

25

De este modo, en este modo de realización, se aplica un reajuste de una imagen anterior a una imagen corriente, para la estimación de la imagen media.

30

El filtrado temporal recursivo se efectúa entonces con reajuste y normalización y, en un ejemplo de realización, el tratamiento global incluye las etapas:

35 - de inicialización, con:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x},1) = 0 \quad \mathbf{N}(\mathbf{x},1) = 0,$$

- de filtrado temporal recursivo, con:

40

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x},n) = (1 - \alpha)\mathbf{I}(\mathbf{x},n) + \alpha\mathbf{I}_f(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}],n-1),$$

donde

$$[\delta_{n,n-1}] = ([\delta x_{n,n-1}], [\delta y_{n,n-1}])$$

45

corresponde a un vector de desfases en líneas x y/o en columnas y, redondeados a los enteros más próximos, entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1 debido a la traslación de la cámara,

- de actualización de una matriz de normalización  $\mathbf{N}$ , con:

50

$$\mathbf{N}(\mathbf{x},n) = (1 - \alpha) \times 1 + \alpha\mathbf{N}(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}],n-1)$$

- y de normalización de la salida del filtro temporal, con:

$$I_m(x, n) = \frac{I}{N(x, n)} I_f(x, n)$$

- 5 La presente invención también tiene por objeto un programa informático que incluye unas instrucciones para la implementación del procedimiento anterior cuando este programa lo ejecuta un procesador. Un ejemplo de organigrama del algoritmo general de tal programa viene dado en la figura 3 que se describirá con detalle más adelante.
- 10 La presente invención también tiene por objeto un dispositivo de tratamiento de datos de imágenes, que incluye una entrada para tratar unos datos de imágenes digitales sucesivas, adquiridas por una cámara sumergida en un líquido que incluye unas turbulencias que provocan un efecto de desplazamiento aparente de los píxeles de las imágenes. En particular, tal dispositivo además incluye unos medios de cálculo para la implementación del anterior procedimiento. Tales medios de cálculo pueden incluir un procesador y una memoria de trabajo para ejecutar, por
- 15 ejemplo, las instrucciones del programa informático mencionado anteriormente.

La presente invención puede aplicarse de manera ventajosa, pero no limitativa, en el tratamiento de datos de imágenes adquiridas por una cámara sumergida en el agua de una instalación nuclear, para filmar unos ensamblajes de combustible. Tal utilización del procedimiento en el sentido de la invención, en este contexto, puede entonces

20 incluir al menos:

- la determinación, a partir de las imágenes adquiridas y tratadas, del estado de los ensamblajes de combustible.

Por ejemplo, se puede determinar, en las imágenes adquiridas y tratadas, al menos un identificador de ensamblaje de combustible.

25 Ventajosamente, esta realización permite controlar y verificar la disposición de los ensamblajes en el núcleo.

La utilización del procedimiento en el sentido de la invención puede además incluir:

- 30 - la medición, en dichas imágenes, de una separación entre los ensamblajes de combustible.

Ventajosamente, esta realización permite controlar y verificar con precisión la disposición de los ensamblajes en el núcleo.

35 Por último, se debe entender que la implementación del procedimiento en el sentido de la invención en el marco de tal utilización permite globalmente la inspección del estado de los ensamblajes, ya sea en el agua de las vasijas de la construcción del reactor o en la piscina de almacenamiento del recinto del combustible.

40 La presente invención tiene también por objeto una instalación para la implementación de tal utilización e incluye al menos una cámara, preferentemente, estanca y resistente a la radiación, conectada a un dispositivo del tipo mencionado anteriormente para la implementación de la invención.

### Descripción de las figuras

45 Otras ventajas y características de la invención se apreciarán tras la lectura de la siguiente descripción detallada de unos ejemplos de realización no limitativos, así como tras el examen de los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 representa esquemáticamente un núcleo de reactor en el marco de una implementación de la invención, así como una instalación que incluye una cámara y un dispositivo para la implementación de la
- 50 invención,
- la figura 2 ilustra esquemáticamente unas etapas del procedimiento en una realización de la invención, con la ayuda de imágenes sin tratar y tratadas por la implementación de la invención,
- la figura 3 es un organigrama esquemático de las etapas del procedimiento en una realización en la que la cámara está en movimiento de traslación,
- 55 - la figura 4 ilustra una imagen nítida obtenida tras la aplicación del procedimiento cuyas etapas se ilustran en la figura 3.

### Descripción detallada de la invención

60 En primer lugar, se hace referencia a la figura 1 en la que un núcleo de reactor en un recinto REC lleno de agua incluye una pluralidad de ensamblajes ENS de combustible nuclear (incluyendo normalmente cada uno una multiplicidad de barras de combustible, por ejemplo). Cada ensamblaje ENS incluye un identificador ID (rodeado por un círculo blanco en la vista de la figura 4) y los ensamblajes están espaciados por una separación entre

ensamblajes SEP.

Se prevé entonces una cámara CAM que filme los ensamblajes ENS y, en particular, una zona denominada "agujeros S" entre tales ensamblajes (no representados en la figura 1) y/o al menos un identificador ID de ensamblaje. Las imágenes obtenidas por la cámara permiten entonces:

- para los orificios S, por ejemplo, detectar en tiempo útil la deformación del agujero, con el fin de disminuir el riesgo de enganche de los ensamblajes de combustible con unos pasadores que intervienen para estabilizar los ensamblajes, y
- para la lectura del identificador del ensamblaje, asegurarse de que cada ensamblaje de combustible está en el emplazamiento especificado en un plano del núcleo predeterminado.

Estas imágenes se toman con la cámara CAM sumergida en el agua que baña los ensamblajes. Debido a las diferencias de temperatura en el agua *in situ* (que conlleva variaciones locales del índice del agua), se crean unas turbulencias ópticas TUR. La presente invención propone modelizar una turbulencia que afecta a una imagen y utilizar este modelo de turbulencia para tratar las imágenes adquiridas. Un modo de realización ventajoso permite tratar también unas traslaciones de la cámara que adquiere estas imágenes, en particular, con una técnica de reajuste de la imagen que se adapta a la velocidad de traslación.

Aún con referencia a la figura 1, la cámara CAM está conectada a un dispositivo DIS para el tratamiento de las imágenes adquiridas y que típicamente incluyen:

- una interfaz INT de recepción de los datos de imágenes adquiridas,
- un procesador PROC y una memoria de trabajo MEM para tratar estos datos de imágenes,
- una interfaz de salida SAL para conformar y comunicar una señal de imagen hacia una pantalla PANT que muestran las imágenes tratadas IMT (estando un ejemplo de imagen tratada representado en la figura 4).

De este modo, la utilización del procedimiento en el sentido de la invención es ventajosa en el contexto de las inspecciones televisuales, concretamente, al final de la recarga de combustible que constituye actualmente una etapa importante de las paradas de actividad de las centrales nucleares para la producción de electricidad. Estas inspecciones televisuales se realizan con el fin de verificar la planta del núcleo (mediante la identificación de los números de ensamblaje) y localizar con exactitud los ensamblajes (por ejemplo, midiendo las holguras entre ensamblajes). Las inspecciones televisuales permiten verificar, además, por ejemplo, el posicionamiento de los ensamblajes.

El procedimiento encuentra así una aplicación ventajosa en el tratamiento de una sucesión de imágenes (fotografías) para ayudar, en concreto, al cálculo de las localizaciones de todo o parte de los elementos de ensamblaje, pero también en la inspección del estado de los ensamblajes, por ejemplo, en la construcción del combustible.

La interpretación de estas inspecciones televisuales con frecuencia plantea dificultades debido al desprendimiento de calor de los combustibles lo que conlleva turbulencias en el agua. Frente a estas dificultades, se ha desarrollado una técnica de tratamiento de las secuencias filmadas. Los algoritmos de estos tratamientos se han concebido para funcionar en tiempo real (para ser, por tanto, capaces de tratar un flujo de vídeo al filo del agua).

Globalmente, el tratamiento se basa en una modelización probabilística del efecto de las turbulencias en los píxeles de las imágenes. Este modelo de turbulencia permite definir un algoritmo de tratamiento de restauración en dos etapas:

- un primer filtrado, temporal, permite obtener una imagen estable, pero borrosa (se muestra que esta imagen borrosa se presenta como la convolución de la imagen nítida original (desconocida) mediante un filtro espacial lineal, cuya expresión es exactamente igual a la densidad de probabilidad del vector de turbulencias);
- un segundo filtrado, en este caso espacial, por ejemplo, de Wiener, permite volver nítida la imagen original (que se obtiene así por deconvolución lineal).

El tratamiento en dos etapas descrito anteriormente se aplica cuando la cámara está fija. Debido al tiempo de convergencia del filtro temporal, es preferible inmovilizar la cámara durante unos segundos antes de obtener una imagen restaurada satisfactoria. En un modo de realización ventajoso, se propone, por tanto, una técnica de tratamiento de imagen cuando la cámara está en movimiento (típicamente un movimiento de traslación, correspondiente al caso más frecuente).

En el caso de una cámara en traslación, se propone una etapa (opcional pero ventajosa) de reajuste de imagen para permitir que el filtro temporal se adapte a las variaciones de la cámara. Este reajuste de la imagen se efectúa mediante una estimación preliminar del movimiento de la cámara. Los resultados son satisfactorios, ventajosamente sin pérdida de calidad con respecto a los tratamientos sobre la cámara fija.

En lo que sigue se describe, en una primera fase, un ejemplo de modelo de degradación debida a las turbulencias.

5 En lo sucesivo,  $I(\mathbf{x},n,c)$  designa el valor del píxel de coordenadas  $\mathbf{x} = (x, y)$  en la  $n^{\text{ésima}}$  imagen en bruto recibida, para la componente  $c$  ( $c = 1,2,3$  respectivamente para las componentes roja, verde y azul). Al ser los tratamientos idénticos en las tres componentes, las notaciones se simplifican no mencionando la componente tratada y  $I(\mathbf{x},n,c)$  se escribe simplemente  $I(\mathbf{x},n)$ .

10 En condiciones ideales (ausencia de turbulencias, cámara fija, escena constante) las imágenes  $I(\mathbf{x},n)$  de la secuencia filmada son resultado del muestreo de una única y misma imagen nítida, original y continua, denotada  $I_{\text{nítida}}(\mathbf{x})$ , siendo  $I(\mathbf{x},n) = I_{\text{nítida}}(\mathbf{x})$ .

Se considera entonces, que, en presencia de turbulencias, cada píxel de la imagen está desplazado de su posición inicial. Al denotar  $\mathbf{u}_{\mathbf{x},n}$  al vector correspondiente al desfase del píxel  $\mathbf{x}$ , en la imagen  $n$ , se puede escribir:

$$I(\mathbf{x}, n) = I_{\text{nítida}}(\mathbf{x} + \mathbf{u}_{\mathbf{x},n})$$

15 Los desplazamientos debidos a las turbulencias son, además, aleatorios. No parece factible encontrar una expresión analítica para el vector desplazamiento  $\mathbf{u}_{\mathbf{x},n}$ .

20 Se propone entonces una descripción probabilística de estos desplazamientos. El vector de turbulencia  $\mathbf{u}_{\mathbf{x},n}$  se considera un vector aleatorio según una determinada densidad de probabilidad denotada:

$$h_{\mathbf{x},n}(\mathbf{u})$$

25 Partiendo de la hipótesis de que las turbulencias son temporal y espacialmente estacionarias (en el caso de un medio líquido como el agua), se puede considerar que la densidad de probabilidad no depende ni de  $\mathbf{x}$ , ni de  $n$  y se puede escribir:

$$h_{\mathbf{x},n}(\mathbf{u}) = h(\mathbf{u})$$

30 donde  $h(\mathbf{u})$  es la densidad de probabilidad de las turbulencias para una imagen  $n$  cualquiera y para un píxel  $\mathbf{x}$  cualquiera.

Los siguientes tratamientos se basan en esta hipótesis de estacionariedad de las turbulencias. En efecto, al denotar  $I_m(\mathbf{x},n)$  a la imagen media en el momento  $n$  definido por:

$$35 \quad I_m(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I(\mathbf{x}, k),$$

se muestra que esta imagen media converge hacia una imagen estable  $I_{\text{estable}}(\mathbf{x})$  igual a la convolución de la imagen nítida original (desconocida) con la densidad de probabilidad de las turbulencias:

$$40 \quad I_{\text{estable}}(\mathbf{x}) = \lim_{n \rightarrow \infty} I_m(\mathbf{x}, n) = [I_{\text{nítida}} \otimes h](\mathbf{x})$$

45 De este modo, para encontrar una imagen nítida desconocida, basta con deconvolucionar la imagen media con la densidad de probabilidad de las turbulencias  $h(\mathbf{u})$ . Al no conocerse esta densidad de probabilidad, a continuación, se propone un modelo empírico para describir las variaciones de la densidad de probabilidad a partir de las siguientes dos consideraciones físicas:

- las turbulencias son en general isótropas y la densidad de probabilidad debe ser independiente del ángulo del vector  $\mathbf{u}$
- 50 - los pequeños desplazamientos de píxeles son más frecuentes que los grandes desplazamientos de píxeles: de este modo, cuando la norma del vector  $\mathbf{u}$  crece, el valor  $h(\mathbf{u})$  debe decrecer.

Por supuesto, otros factores pueden intervenir en la elección del modelo. Por ejemplo, puede resultar práctico para ello disponer de una expresión analítica parametrizable de  $h(\mathbf{u})$  y, sobre todo, de su transformada de Fourier. Un modelo simple que verifique el conjunto de estas hipótesis es de tipo decrecimiento exponencial, tal como, por ejemplo:

$$h_{\sigma}(\mathbf{u}) = \frac{3}{\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{\sqrt{6}\|\mathbf{u}\|}{\sigma}\right\}$$

5 En esta fórmula  $\sigma$  representa la desviación típica (variación media) de la norma del vector de turbulencias. Este parámetro permite tomar en cuenta la diferencia del nivel de turbulencias según las secuencias filmadas. Como variante, se puede utilizar un modelo gaussiano. No obstante, los ensayos con un modelo exponencial han dado buenos resultados. Por supuesto, también se pueden contemplar, como variante, otros tipos de modelos que presenten decrecimientos más lentos que los modelos gaussianos o exponenciales.

10 A continuación, es posible estimar la imagen original en dos etapas de tratamiento. Como primer paso, la secuencia de las imágenes en bruto se promedia temporalmente. Esta imagen media converge hacia una imagen estable  $I_{\text{estable}}(\mathbf{x})$  igual a la convolución de la imagen nítida desconocida (que se observaría en ausencia de turbulencias) con la densidad de probabilidad de las turbulencias, con:

$$I_{\text{estable}}(\mathbf{x}) = \lim_{n \rightarrow \infty} I_m(\mathbf{x}, n) = [I_{\text{nítida}} \otimes h](\mathbf{x})$$

15 La deconvolución de la imagen media con la densidad de probabilidad de las turbulencias permiten entonces, como segundo paso, estimar la imagen nítida original.

20 La figura 2 ilustra dos etapas principales del tratamiento en unas imágenes reales de un ensamblaje. Un primer filtro F1, temporal, permite obtener una imagen media ISB, estable pero borrosa, a partir de una sucesión de imágenes  $IM_n, IM_{n-1}$ , etc.

Un segundo filtro F2, de deconvolución espacial, permite remontar a la imagen nítida original  $IN$ , a partir de la imagen borrosa ISB.

25 A continuación, se describe el filtrado temporal F1.

Si la escena filmada es constante (salvo por las turbulencias), concretamente en términos de iluminación, de factor de ampliación "zoom", etc., la  $n^{\text{ésima}}$  imagen promediada se obtiene con la siguiente fórmula:

$$I_m(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I(\mathbf{x}, k)$$

30 En esta fórmula, se asigna el mismo peso a cada imagen. Para gestionar eventuales variaciones de la escena (iluminación y otras), es preferible asignar, en la imagen promediada, más peso a las imágenes recientes que a las imágenes pasadas. Se toma como imagen media en el momento  $n$  la imagen  $I_{\alpha}(\mathbf{x}, n)$  dada por:

$$I_{\alpha}(\mathbf{x}, n) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \sum_{k=0}^{n-1} \alpha^k I(\mathbf{x}, n-k)$$

40 El término  $\alpha$  es un factor de olvido que permite asignar más o menos importancia a las imágenes pasadas (como una memoria temporal del filtro). La normalización mediante el término

$$\frac{1-\alpha}{1-\alpha^n}$$

permite tener una suma geométrica de los pesos  $\alpha^k$  igual a 1, ya que:

$$\frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \sum_{k=0}^{n-1} \alpha^k = 1$$

45 La fórmula  $I_{\alpha}(\mathbf{x}, n)$  puede ponerse en forma de filtrado recursivo temporal seguido de una etapa de normalización. La

$n$ ésima salida del filtro temporal denotada  $I_f(\mathbf{x},n)$  y la imagen de salida normalizada denotada  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$  están entonces vinculadas por:

$$I_f(\mathbf{x},n) = \alpha I_f(\mathbf{x},n-1) + (1-\alpha)I(\mathbf{x},n)$$

$$I_\alpha(\mathbf{x},n) = \frac{1}{1-\alpha^n} I_f(\mathbf{x},n)$$

5 El valor seleccionado para el factor de olvido ha condicionado los resultados del filtro temporal. Para evaluar estos resultados, se define la desviación cuadrática media entre el píxel  $\mathbf{x}$  de la  $n$ ésima imagen y el píxel  $\mathbf{x}$  de la imagen estable, diana, como sigue:

$$10 \quad \Gamma_\alpha^2(\mathbf{x},n) = E\left\{ \left( I_\alpha(\mathbf{x},n) - I_{\text{estable}}(\mathbf{x}) \right)^2 \right\}$$

Entonces es posible definir una desviación cuadrática media para el conjunto de la imagen  $n$ :

$$15 \quad \Gamma_\alpha^2(n) = \frac{1}{N_{\text{píxeles}}} \sum_{\mathbf{x}} \Gamma_\alpha^2(\mathbf{x},n)$$

En el caso de una escena constante, salvo por las turbulencias, se demuestra que:

$$20 \quad \Gamma_\alpha^2(n) = \frac{(1-\alpha^{2n})(1-\alpha)}{(1-\alpha^n)^2(1+\alpha)} \Sigma^2$$

donde  $\Sigma^2$  es la varianza media de los píxeles en una imagen en bruto. Tras la convergencia (cuando  $n$  tiende a infinito), la salida normalizada del filtro temporal tiene como desviación cuadrática residual:

$$25 \quad \Gamma_\alpha^2(\infty) = \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \Sigma^2$$

Los cálculos de la evolución de la desviación típica en función del número de imágenes tratadas, para diferentes valores del factor de olvido  $\alpha$ , muestran que, en el caso de una escena fija, es preferible elegir a lo más grande posible. En el caso de una escena variable, no obstante, la elección de un factor de olvido  $\alpha$  es el resultado de un compromiso entre un escaso tiempo de adaptación a un cambio de escena ( $\alpha$  pequeño) y una pequeña desviación típica residual ( $\alpha$  grande). Si, por ejemplo, un brusco cambio de escena (variación de iluminación, por ejemplo) interviene en un momento  $n_0$ , cuando el filtro temporal ha convergido, se muestra que la desviación típica entre la salida del filtro en el momento  $n$  y la imagen estable se convierte en:

$$30 \quad \Gamma_\alpha^2(n) = \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \Sigma^2 + \alpha^{2(n-n_0)} \Delta^2$$

35 donde  $\Delta$  representa la variación media de nivel provocado por el cambio de escena.

De este modo, cuanto más elevado es el factor de olvido  $\alpha$ , más aumenta el tiempo de convergencia (aproximadamente 300 imágenes, es decir, 12 segundos, para  $\alpha=0,99$ ), pero la desviación típica residual es lo bastante pequeña (0,07 para  $\alpha=0,99$ ) para que la imagen de salida pueda estabilizarse. Disminuyendo el valor elegido de  $\alpha$ , se aumenta la velocidad de convergencia (aproximadamente 50 imágenes, es decir, 2 segundos, para  $\alpha=0,95$ ), pero se aumenta asimismo la desviación típica residual (0,16 para  $\alpha=0,95$ ). La imagen de salida no está totalmente estabilizada, incluso después de la convergencia.

45 En una realización actual, preferentemente, el factor de olvido se fija en 0,99. Se trata de un valor óptimo en el caso de una escena constante (salvo por las turbulencias). No obstante, el tratamiento presentado en el presente

documento es bastante flexible para adaptarse a variaciones frecuentes de la escena filmada (típicamente un cambio de iluminación).

5 En particular, en el caso de una cámara en movimiento (presentada más adelante) cada elemento de la escena solo es visible en un número reducido de imagen. Podría ser preferible disminuir el factor de olvido para dar más importancia al tiempo de convergencia que a la varianza residual. A continuación, se describe el filtrado espacial que interviene en una segunda etapa del procedimiento, en un ejemplo de realización.

10 Conforme al modelo de degradación descrito anteriormente, la salida normalizada  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$  se vuelve igual a la imagen estable  $I_{\text{estable}}(\mathbf{x})$  (convolución de la imagen nítida desconocida por la densidad de probabilidad de las turbulencias), a la que se añade un ruido  $b(\mathbf{x},n)$  de varianza media dado por:

$$\Gamma_\alpha^2(n) = \frac{(1 - \alpha^{2n})(1 - \alpha)}{(1 - \alpha^n)^2(1 + \alpha)} \Sigma^2$$

15 lo que se escribe:

$$\mathbf{I}_\alpha(\mathbf{x},n) = [\mathbf{I}_{\text{nítida}} \otimes \mathbf{h}_\sigma](\mathbf{x}) + b(\mathbf{x},n)$$

20 La estimación de la imagen nítida a partir de la salida  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$  se asemeja, por tanto, a un problema de deconvolución espacial lineal. El filtro de restauración óptima viene dado por la fórmula de Wiener, es decir, en la región espectral:

$$W_\sigma(\mathbf{f}) = \frac{H_\sigma^*(\mathbf{f})}{\|H_\sigma(\mathbf{f})\|^2 + \frac{S_b(\mathbf{f})}{S_{\text{nítida}}(\mathbf{f})}}, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| \leq f_c$$

$$W_\sigma(\mathbf{f}) = 0, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| > f_c$$

donde:

- 25
- $\mathbf{f}$  es el vector bidimensional ( $\mathbf{f}=(f,g)$ ) de las dos frecuencias normalizadas tras la transformada de Fourier 2D,
  - $f_c$  es la frecuencia de corte del filtro que permite eliminar eventuales repliegues espectrales en las imágenes de entrada,
  - $S_b(\mathbf{f})$  y  $S_{\text{nítida}}(\mathbf{f})$  son respectivamente las densidades espectrales de potencia del ruido y de la imagen nítida a encontrar, y
  - $H_\sigma(\mathbf{f})$  es la transformada de Fourier 2D de  $h(\mathbf{u})$ .
- 30

Con el modelo exponencial elegido para  $h(\mathbf{u})$ , se tiene:

$$H_\sigma(\mathbf{f}) = \text{TF}_{2D}\{h_\sigma(\mathbf{u})\} = \left(1 + \frac{2}{3}(\pi\sigma\|\mathbf{f}\|)^2\right)^{-\frac{3}{2}}$$

35 Como primer paso, se forma la hipótesis de que el ruido y la imagen tienen una densidad espectral de potencia constante (imagen y ruido blancos, siendo  $S_b(\mathbf{f})$  y  $S_{\text{nítida}}(\mathbf{f})$  constantes). Sabiendo que la transformada de Fourier de una densidad de probabilidad es real, el filtro óptimo de restauración de las imágenes entonces viene dado por:

$$W_\sigma(\mathbf{f}) = \frac{H_\sigma(\mathbf{f})}{H_\sigma^2(\mathbf{f}) + \text{RBS}}$$

40 En el presente documento, el término RRS que designa la "Relación de Ruido sobre la Señal" corresponde a la relación entre la potencia del ruido a la salida del filtro temporal y la potencia de la imagen nítida (desconocida). Este filtro de restauración incluye dos parámetros: RRS y  $\sigma$ . Estos dos parámetros tienen una influencia sobre la

45

respuesta en frecuencia del filtro. Para obtener un orden de magnitud de la RRS, se puede considerar que la imagen nítida (desconocida) tiene unos valores de píxeles distribuidos de manera uniforme sobre un intervalo P. Se muestra que la varianza de los valores adoptados por los píxeles es entonces de  $P^2/12$ . Tras la convergencia del filtro temporal, la varianza residual es igual a  $(1-\alpha)/(1+\alpha) \cdot \Sigma^2$ , donde  $\Sigma^2$  es la varianza del ruido sobre las imágenes en bruto y  $\alpha$  es el factor de olvido del filtro. Se tiene así para la relación RRS:

$$RBS = \frac{\left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha}\right)\Sigma^2}{\left(\frac{P^2}{12}\right)} = 12 \cdot \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha}\right) \left(\frac{\Sigma}{P}\right)^2$$

Por ejemplo, para una relación de "ruido/intervalo de la imagen", antes del tratamiento, de  $\Sigma/P=0,1$  y con un factor de olvido  $\alpha=0,99$ , se obtiene una RRS de  $6 \cdot 10^{-4}$ . Este resultado da un orden de magnitud del valor óptimo de la RRS.

La relación RRS se puede fijar empíricamente tras diferentes pruebas en las imágenes tratadas. Normalmente, resulta que cuando la RRS tiende a 0, el filtro de deconvolución tiende a un filtro inverso en  $1/H_o(f)$ , paso-alto y demasiado sensible al ruido. Un valor demasiado pequeño de RRS da, por tanto, unas imágenes restauradas ruidosas (habiéndose observado un ruido "granular" en las imágenes tratadas). Si la RRS tiende al infinito, el filtro de deconvolución tiende hacia el filtro de flujo  $H_o(f)$ . Un valor de RRS demasiado elevado conlleva una imagen restaurada borrosa. Un valor óptimo para la RRS se sitúa conforme a los ensayos entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$ , de manera que se ha seleccionado un valor por defecto de  $10^{-3}$ .

El parámetro  $\sigma$  permite adaptar el filtro de restauración a la desviación típica (variación media) de las turbulencias. Normalmente, si  $\sigma$  es inferior a la desviación típica real de las turbulencias, el flujo de la imagen filtrada temporalmente (a la entrada del filtro espacial) no está totalmente atenuado. Si  $\sigma$  es superior a la desviación típica real de las turbulencias, las frecuencias altas de la imagen se amplifican demasiado y la imagen se degrada. El valor óptimo de  $\sigma$  depende en gran medida del nivel de las turbulencias y del factor de ampliación (degradando las turbulencias más las secuencias vídeo cuando el factor de ampliación es importante). Un ejemplo de valor óptimo para  $\sigma$  se sitúa en torno a 8 píxeles para turbulencias débiles. Por el contrario, para turbulencias fuertes con un factor de ampliación importante, el valor óptimo para  $\sigma$  se sitúa en torno a 30 píxeles. Se comprenderá entonces que  $\sigma$  se puede seleccionar de entre 0 y 30 píxeles. Este parámetro se puede actualizar a medida que se obtienen imágenes, en el trascurso de los tratamientos y según la calidad de las imágenes obtenidas.

A continuación, se describe un modo de realización en el que se tiene en cuenta el traslado de la cámara que filma las imágenes.

El tratamiento propuesto anteriormente consistía en deconvolucionar la salida normalizada de un filtro temporal dado con:

$$I_\alpha(\mathbf{x}, n) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \sum_{k=1}^n \alpha^{n-k} I(\mathbf{x}, k)$$

No obstante, esta media anterior ya no tiene sentido si la cámara está en movimiento y si las imágenes en bruto están desfasadas las unas con respecto a las otras. En el caso de una cámara en traslación, cada imagen k está desfasada por determinado vector  $\delta_{n,k}$  con respecto a la imagen corriente n. Si cada imagen se vuelve a ajustar en función de su desplazamiento, la fórmula anterior se convierte en:

$$I_\alpha(\mathbf{x}, n) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^{n(x)}} \sum_{k=n-n(x)+1}^n \alpha^{n-k} \tilde{I}(\mathbf{x} + \delta_{nk}, k)$$

$\delta_{nk} = (\delta_{x_{nk}}, \delta_{y_{nk}})$  es el vector de los desfases en columna (según x) y en línea (según y) entre la imagen k y la imagen n y  $n(x)$  designa el número de imágenes sucesivas que contienen el píxel  $\mathbf{x}$  tras el reajuste.

La expresión:

$$\tilde{I}(\mathbf{x} + \delta_{nk}, k)$$

es la interpolación de la imagen en bruto en  $\mathbf{x} + \delta_{nk}$

Como en el caso de una restauración de cámara fija, la imagen media puede conformarse como un filtro recursivo seguido de una normalización. La normalización es en este caso más compleja que en el caso de una cámara fija, dado que el número de imágenes disponibles depende de la zona de la imagen considerada (normalización por píxel). Se muestra, no obstante, que se expresa como sigue:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha)\mathbf{I}(\mathbf{x}, n) + \alpha\tilde{\mathbf{I}}_f(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n-1),$$

$$\mathbf{I}_\alpha(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{1 - \alpha^{n(\mathbf{x})}} \mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n).$$

Estas expresiones hacen intervenir, por tanto, la interpolación de la salida anterior del filtro (momento n-1).

Para evitar operaciones de interpolación de complicados cálculos, se elige simplificar la ecuación de filtrado como sigue:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha)\mathbf{I}(\mathbf{x}, n) + \alpha\mathbf{I}_f(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n-1),$$

$$\mathbf{I}_\alpha(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{1 - \alpha^{n(\mathbf{x})}} \mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n)$$

En esta expresión, se denota:

$$[\delta_{n,n-1}] = ([\delta x_{n,n-1}], [\delta y_{n,n-1}])$$

al vector de los desfases en líneas y en columnas, redondeados a los enteros más próximos, entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1.

Se muestra que se calcula simplemente una matriz de normalización por píxel:

$$\mathbf{N}(\mathbf{x}, n) = 1 - \alpha^{n(\mathbf{x})}$$

calculando la salida del filtro temporal reajustado, cuando se pone en la entrada una imagen constante igual a 1 en todos los píxeles.

La operación completa de filtrado temporal con reajuste y normalización se escribe finalmente, según cuatro etapas:

- inicialización:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x}, 1) = 0 \quad \mathbf{N}(\mathbf{x}, 1) = 0,$$

- filtrado temporal:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha)\mathbf{I}(\mathbf{x}, n) + \alpha\mathbf{I}_f(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n-1),$$

- Actualización de la matriz de normalización:

$$\mathbf{N}(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha) \times 1 + \alpha\mathbf{N}(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n-1)$$

- Normalización de la salida del filtro temporal:

$$\mathbf{I}_m(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{\mathbf{N}(\mathbf{x}, n)} \mathbf{I}_f(\mathbf{x}, n)$$

De este modo, en cada imagen recibida:

- como primer paso, se estima el desfase  $\delta_{n,n-1}$  entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1,
  - este desfase se utiliza para reajustar el filtro temporal y
  - para calcular la matriz de normalización por píxel,
- 5 - después, se deconvoluciona la salida normalizada del filtro temporal mediante un filtro espacial.

El método de deconvolución es el descrito anteriormente en el caso de una cámara fija.

10 A continuación, se describe una estimación de una traslación entre dos imágenes. Existen varios tipos de enfoques para estimar el desfase entre diferentes imágenes. En el presente documento se da prioridad a las técnicas simples, con el fin de contemplar tratamientos en tiempo real. El enfoque más simple consiste en buscar el máximo de intercorrelación entre las imágenes. Con el fin de no ser sensible a los ruidos, a las turbulencias y a las variaciones de iluminación, es preferible no trabajar en las propias imágenes, sino en los contornos de la imagen. De este modo, la estimación del desfase entre dos imágenes consiste en dos etapas. Como primer paso, se obtienen las dos  
15 imágenes de "contorno" mediante el filtrado de las imágenes iniciales. Como segundo paso, se calcula la matriz de intercorrelación entre las dos imágenes. Las coordenadas del máximo de intercorrelación indican el desfase en línea y en columna entre las dos imágenes.

20 El filtro que permite obtener las imágenes de los contornos es un filtro de Sobel dado por:

$$x \in [-M_{\text{Sobel}} \ M_{\text{Sobel}}]: \text{Sobel}(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\text{Sobel}}^3} \exp\left\{ \frac{-x^2}{2\sigma_{\text{Sobel}}^2} \right\}$$

25 donde  $\sigma_{\text{Sobel}}$  regula el ancho de banda del filtro y  $M_{\text{Sobel}}$  es el tamaño de la ventana de filtrado. Unos valores ventajosos de estos parámetros son  $\sigma_{\text{Sobel}}=0,9$  píxeles  $M_{\text{Sobel}}=5 \cdot \sigma_{\text{Sobel}}$ .

El mismo filtro se utiliza para filtrar las líneas, luego las columnas de una imagen  $I(x,y)$  para obtener la imagen de contorno denotada  $I_{\text{contorno}}(x,y)$ :

$$\begin{aligned} I_{\text{temp}}(x,y) &= \sum_{k=-M_{\text{Sobel}}}^{M_{\text{Sobel}}} \text{Sobel}(k) I(x-k,y) \\ I_{\text{contorno}}(x,y) &= \sum_{k=-M_{\text{Sobel}}}^{M_{\text{Sobel}}} \text{Sobel}(k) I_{\text{temp}}(x,y-k) \end{aligned}$$

30 La intercorrelación entre dos imágenes de contorno  $I^1_{\text{contorno}}(x,y)$  y  $I^2_{\text{contorno}}(x,y)$  viene dada, a continuación, por:

$$\gamma(\delta x, \delta y) = \sum_x \sum_y I^1_{\text{contorno}}(x,y) I^2_{\text{contorno}}(x+\delta x, y+\delta y)$$

35 Para reducir sustancialmente el tiempo de cálculo, el término:

$$\gamma(\delta x, \delta y)$$

40 puede obtenerse utilizando transformadas de Fourier rápidas:

$$\gamma(\delta x, \delta y) = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} \left[ I^1_{\text{contorno}}(x,y) \right] \times \text{FFT} \left[ I^2_{\text{contorno}}(N_{\text{columnas}} - x, N_{\text{lineas}} - y) \right] \right\}$$

45 Para reducir aún más el tiempo de cálculo, la estimación del movimiento solo se efectúa en un único canal de la imagen. Podría ocurrir que las líneas de las imágenes en bruto recibidas estén entrelazadas. En este caso, resulta preferible conservar solo una línea de cada dos (por ejemplo, las líneas pares) en las imágenes interrelacionadas. Por último, en ciertos casos, la secuencia vídeo contiene unos datos en sobre-inscripción (normalmente la fecha y la hora, el nombre del segmento, las coordenadas del ensamblaje filmado). Por supuesto, se recomienda no utilizar esta zona de la imagen para estimar el desfase.

50 A continuación, se describe el cálculo del reajuste.

Con el fin de reajustar las salidas sucesivas del filtro temporal entre dos imágenes, una primera solución consiste en calcular en cada momento n el desfase  $\delta_{n,n-1}$  entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1. No obstante, los ensayos han demostrado que este enfoque no puede aplicarse en el caso (frecuente) de que la cámara se mueva lentamente. Esto se explica como sigue: suponiendo, por ejemplo, que el movimiento de la cámara conlleve un desplazamiento de 0,3 líneas por imagen y un desplazamiento nulo sobre las columnas, la matriz de interrelación entre dos imágenes sucesivas se vuelve en general máxima en  $\delta_{n,n-1} = ([0], [0,3]) = (0,0)$ . De este modo, no se puede detectar ningún desplazamiento y ninguna imagen se reajusta, mientras que el movimiento de la cámara precisa, sin embargo, un reajuste real de aproximadamente 3 líneas cada diez imágenes.

Para poder seguir unos desplazamientos lentos (normalmente inferiores a 0,5 líneas o columna por imagen) a continuación, se propone otro enfoque. El desfase no se estima entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1, sino entre la imagen corriente n y una imagen de referencia  $\delta_{n,ref}$ .

El término  $\delta_{n,n-1}$  viene dado a continuación, simplemente por:

$$\delta_{n,n-1} = \delta_{n,ref} - \delta_{n-1,ref}$$

La siguiente tabla 1 ilustra tal tratamiento en el caso de una velocidad de variación de 0,3 líneas por imagen. En este ejemplo, se estima bien una media de tres imágenes desfasadas cada 10 imágenes. La imagen de referencia se vuelve a actualizar cuando la imagen corriente está sustancialmente desfasada. Se ha fijado un umbral de 20 píxeles de desfase máximo, lo que permite gestionar cualquier movimiento de la cámara a una velocidad superior a 1/20 (es decir, 0,05 líneas/columnas por imagen), lo que resulta suficiente para los casos de las aplicaciones contempladas.

**Tabla 1**

índice de la imagen	$n_{ref}$	$n_{ref+1}$	$n_{ref+2}$	$n_{ref+3}$	$n_{ref+4}$	$n_{ref+5}$	$n_{ref+6}$	$n_{ref+7}$	$n_{ref+8}$	$n_{ref+9}$	$n_{ref+10}$
desfase real de imagen corriente / imagen de referencia $\delta y_{n,ref}$	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
desfase estimado de imagen corriente / imagen de referencia $[\delta y_{n,ref}]$	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
desfase estimado de imagen corriente / imagen anterior $\delta y_{n,n-1} = [\delta y_{n,ref}] - [\delta y_{n-1,ref}]$		0	1	0	0	1	0	0	0	1	0

La figura 3 resume las diferentes etapas del tratamiento de imágenes, en una situación de movimiento, con:

- a partir de una imagen corriente  $IM_n$  (momento n), en la etapa S1, la estimación del desfase, y, eventualmente si el desfase estimado en la etapa S1 supera un umbral (prueba S6), una actualización del umbral en la etapa S7,
- en la etapa S2, el cálculo del reajuste,
- el filtrado temporal en la etapa S3 y la normalización por píxel en la etapa S4, y
- el filtrado espacial en la etapa S5 para obtener la imagen nítida IN.

Los resultados del tratamiento son satisfactorios, sin pérdida de calidad con respecto a los tratamientos sobre la cámara fija. No obstante, algunos artefactos pueden aparecer cuando la cámara se pone en movimiento tras haber permanecido parada unos segundos. Sin embargo, estos artefactos no son funcionalmente molestos. Como se ilustra en la figura 4, estos artefactos (línea indicada por la flecha negra de esta figura) no impiden ni la lectura de un número de ensamblaje (dentro del círculo blanco, que lleva el número "2D EL"), ni el cálculo de una holgura entre los ensamblajes (doble flecha blanca). Además, estos artefactos pueden reducirse mediante técnicas simples de tratamiento de imágenes.

Por supuesto, la presente invención no se limita a las formas de realización descritas anteriormente, a modo de ejemplo; sino que se extienden a otras variantes.

5 En el ejemplo anterior, el filtro temporal realiza una simple media de las imágenes sucesivas de la secuencia de vídeo. En esta media, se puede prever el asignar más peso (o respectivamente menos pesos) a las imágenes de buena (respectivamente de mala) calidad. De manera más general, el filtro temporal podría sustituirse por unos tratamientos de fusión de imágenes más apropiados. No obstante, estos enfoques suponen la definición de uno o varios indicadores de calidad, calculados en la zona de interés de la imagen (zona que contiene el número de ensamblaje).

10 El filtro espacial presentado anteriormente opera sobre la totalidad de la imagen. Se puede prever como variante el concentrar los tratamientos sobre la zona de interés. En particular, se podría tomar en cuenta información "a priori" como el carácter binario de la zona que contiene el número en el tratamiento de restauración.

15 Además, el filtro espacial actual realiza una deconvolución de Wiener sobre el conjunto de la imagen. También podrían preverse, asimismo, otros tratamientos de deconvolución, por ejemplo, a base de trenes de ondas.

20 Además, conviene destacar que podrían ser ventajosas unas técnicas de realce de contrastes mediante la igualación local de histogramas para la igualación de contrastes.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de tratamiento de datos de imágenes digitales sucesivas, adquiridas por una cámara sumergida en un líquido que incluye unas turbulencias que provocan un efecto de desplazamiento aparente de píxeles de las imágenes, **caracterizado por que** incluye:

- una modelización del efecto de las turbulencias sobre los píxeles de las imágenes, y
- una deconvolución con dicha modelización de una imagen promediada en el tiempo,

10 y **por que** la modelización incluye la estimación de un modelo de densidad de probabilidad de un vector de desplazamiento  $\mathbf{u}$  relativo al efecto de las turbulencias.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por que** dicho modelo es de tipo decrecimiento exponencial.

15 3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado por que** dicho modelo  $h_\sigma(\mathbf{u})$  se expresa en función del vector  $\mathbf{u}$ , mediante una relación de tipo:

$$h_\sigma(\mathbf{u}) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{B\|\mathbf{u}\|}{\sigma}\right\}$$

20 donde:

- $\sigma$  representa la desviación típica de la norma del vector  $\mathbf{u}$ ,
- A y B son unas constantes reales positivas.

25 4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado por que**  $A=3/\pi$  y  $B=\sqrt{6}$ .

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** la imagen media a lo largo del tiempo se estima mediante una media ponderada por unas potencias de un factor de olvido, respectivamente decrecientes en función del tiempo.

30 6. Procedimiento según la reivindicación 5, **caracterizado por que** la imagen media  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$ , estimada en el momento n para un píxel de coordenadas vectoriales  $\mathbf{x}$ , viene dada por:

$$I_\alpha(\mathbf{x},n) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \sum_{k=0}^{n-1} \alpha^k I(\mathbf{x},n-k)$$

35 siendo el término  $\alpha$  un número real correspondiente al factor de olvido.

40 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** la imagen media a lo largo del tiempo se estima mediante un filtrado temporal recursivo.

8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7 tomada en combinación con la reivindicación 6, **caracterizado por que** una  $n^{\text{ésima}}$  salida del filtro temporal, para el momento n, denotada  $I_f(\mathbf{x},n)$ , y la imagen media  $I_\alpha(\mathbf{x},n)$  están vinculadas por las relaciones:

$$I_f(\mathbf{x},n) = \alpha I_f(\mathbf{x},n-1) + (1-\alpha) I_\alpha(\mathbf{x},n)$$

$$I_\alpha(\mathbf{x},n) = \frac{1}{1-\alpha^n} I_f(\mathbf{x},n)$$

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5, 6 y 8, **caracterizado por que** el factor de olvido  $\alpha$  se selecciona igual a 0,99.

50 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** dicha deconvolución incluye la aplicación de un filtrado espacial, lineal, de expresión correspondiente a dicha modelización.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, **caracterizado por que** el filtrado es de tipo Wiener.

12. Procedimiento según la reivindicación 11, **caracterizado por que** el filtro espacial viene dado en el rango espectral por:

$$W_{\sigma}(\mathbf{f}) = \frac{H_{\sigma}^*(\mathbf{f})}{\|H_{\sigma}(\mathbf{f})\|^2 + \frac{S_b(\mathbf{f})}{S_{nítida}(\mathbf{f})}}, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| \leq f_c$$

$$W_{\sigma}(\mathbf{f}) = 0, \quad \text{si } \|\mathbf{f}\| > f_c$$

5 donde:

- $\mathbf{f}$  es un vector bidimensional de dos frecuencias normalizadas tras la transformada de Fourier bidimensional,
- $f_c$  es una frecuencia de corte del filtro para eliminar eventuales repliegues espectrales,
- 10 -  $S_b(\mathbf{f})$  y  $S_{nítida}(\mathbf{f})$  son respectivamente unas densidades espectrales de potencia de un ruido y de una imagen nítida a determinar, y
- $H_{\sigma}(\mathbf{f})$  es la transformada de Fourier bidimensional de la densidad de probabilidad del efecto de las turbulencias  $h_{\sigma}(\mathbf{u})$ .

15 13. Procedimiento según la reivindicación 12, **caracterizado por que** el filtro espacial se expresa mediante:

$$W_{\sigma}(\mathbf{f}) = \frac{H_{\sigma}(\mathbf{f})}{H_{\sigma}^2(\mathbf{f}) + \text{RBS}}$$

20 donde el término RRS se expresa en función de parámetros seleccionados de manera que el término RRS esté comprendido entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$ .

14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 12 y 13, tomada en combinación con la reivindicación 3, **caracterizado por que** la transformada de Fourier bidimensional  $H_{\sigma}(\mathbf{f})$  de la densidad de probabilidad del efecto de las turbulencias  $h_{\sigma}(\mathbf{u})$ , viene dada por:

25

$$H_{\sigma}(\mathbf{f}) = \left(1 + C(\sigma \cdot \|\mathbf{f}\|)^2\right)^{\frac{3}{2}}$$

donde C es una constante real positiva y  $\sigma$  es un real positivo contado en número de píxeles.

30 15. Procedimiento según la reivindicación 14, **caracterizado por que** la transformada de Fourier bidimensional  $H_{\sigma}(\mathbf{f})$  viene dada por:

$$H_{\sigma}(\mathbf{f}) = \left(1 + \frac{2}{3}(\pi\sigma \cdot \|\mathbf{f}\|)^2\right)^{\frac{3}{2}}$$

35 con  $\sigma$  comprendido entre 0 y 30 píxeles.

16. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha cámara se desplaza en traslación, **caracterizado por que** se aplica un reajuste de una imagen anterior a una imagen corriente, para la estimación de la imagen media.

40

17. Procedimiento según la reivindicación 16, tomada en combinación con la reivindicación 7, **caracterizado por que** incluye un filtrado temporal con reajuste y normalización.

18. Procedimiento según la reivindicación 17, tomada en combinación con la reivindicación 8, **caracterizado por que** incluye las etapas:

45

- de inicialización, con:

$$\mathbf{I}_f(\mathbf{x},1) = 0 \quad \mathbf{N}(\mathbf{x},1) = 0,$$

50

- de filtrado temporal recursivo, con:

$$I_f(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha)I(\mathbf{x}, n) + \alpha I_f(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n - 1),$$

5 donde

$$[\delta_{n,n-1}] = ([\delta x_{n,n-1}], [\delta y_{n,n-1}])$$

10 corresponde a un vector de desfases en líneas x y/o en columnas y, redondeados a los enteros más próximos, entre la imagen corriente n y la imagen anterior n-1 debido a la traslación de la cámara,  
- de actualización de una matriz de normalización **N**, con:

$$N(\mathbf{x}, n) = (1 - \alpha) \times 1 + \alpha N(\mathbf{x} + [\delta_{n,n-1}], n - 1)$$

15 - y de normalización de la salida del filtro temporal, con:

$$I_m(\mathbf{x}, n) = \frac{1}{N(\mathbf{x}, n)} I_f(\mathbf{x}, n)$$

20 19. Programa informático que incluye unas instrucciones para la implementación del procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores cuando este programa es ejecutado por un procesador (PROC).

25 20. Dispositivo de tratamiento de datos de imágenes, que incluye una entrada para tratar unos datos de imágenes digitales sucesivas, adquiridas por una cámara sumergida en un líquido que incluye unas turbulencias que provocan un efecto de desplazamiento aparente de píxeles de las imágenes,  
**caracterizado por que** además incluye unos medios de cálculo para la implementación del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 18.

30 21. Utilización del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 18, en el tratamiento de datos de imágenes adquiridas por una cámara sumergida en el agua de una instalación nuclear, para filmar unos ensamblajes de combustible, **caracterizada por que** incluye al menos:

- la determinación, a partir de las imágenes adquiridas y tratadas, del estado de los ensamblajes de combustible.

35 22. Utilización según la reivindicación 21, **caracterizada por que** incluye al menos:

- la determinación, en dichas imágenes adquiridas y tratadas, de al menos un identificador de ensamblaje de combustible.

40 23. Utilización según una de las reivindicaciones 21 y 22, **caracterizada por que** además incluye:

- la medición, en dichas imágenes, de una separación entre los ensamblajes de combustible.

45 24. Instalación para la implementación de una utilización según una de las reivindicaciones 21 a 23, **caracterizada por que** incluye al menos una cámara y un dispositivo según la reivindicación 20.

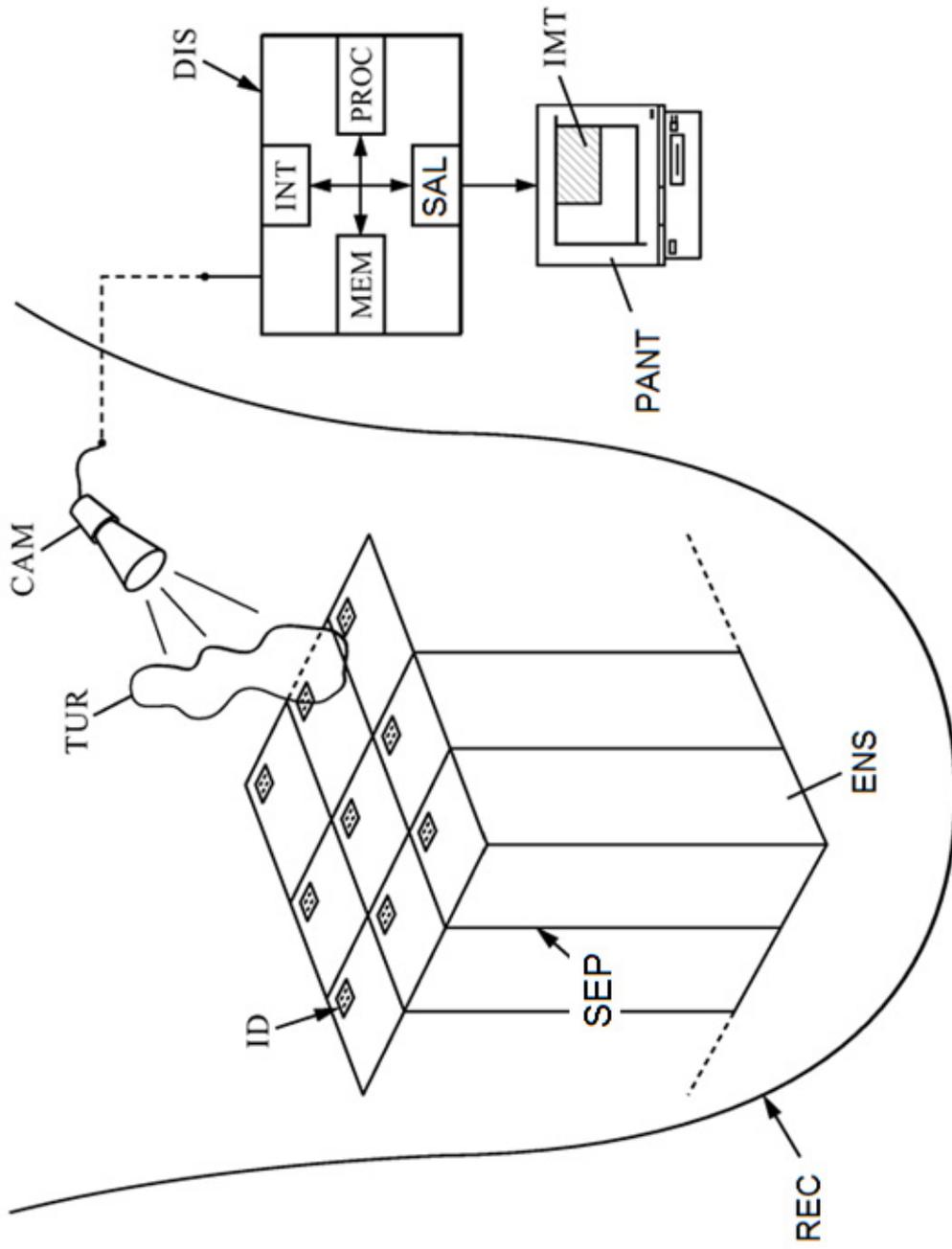


FIG. 1

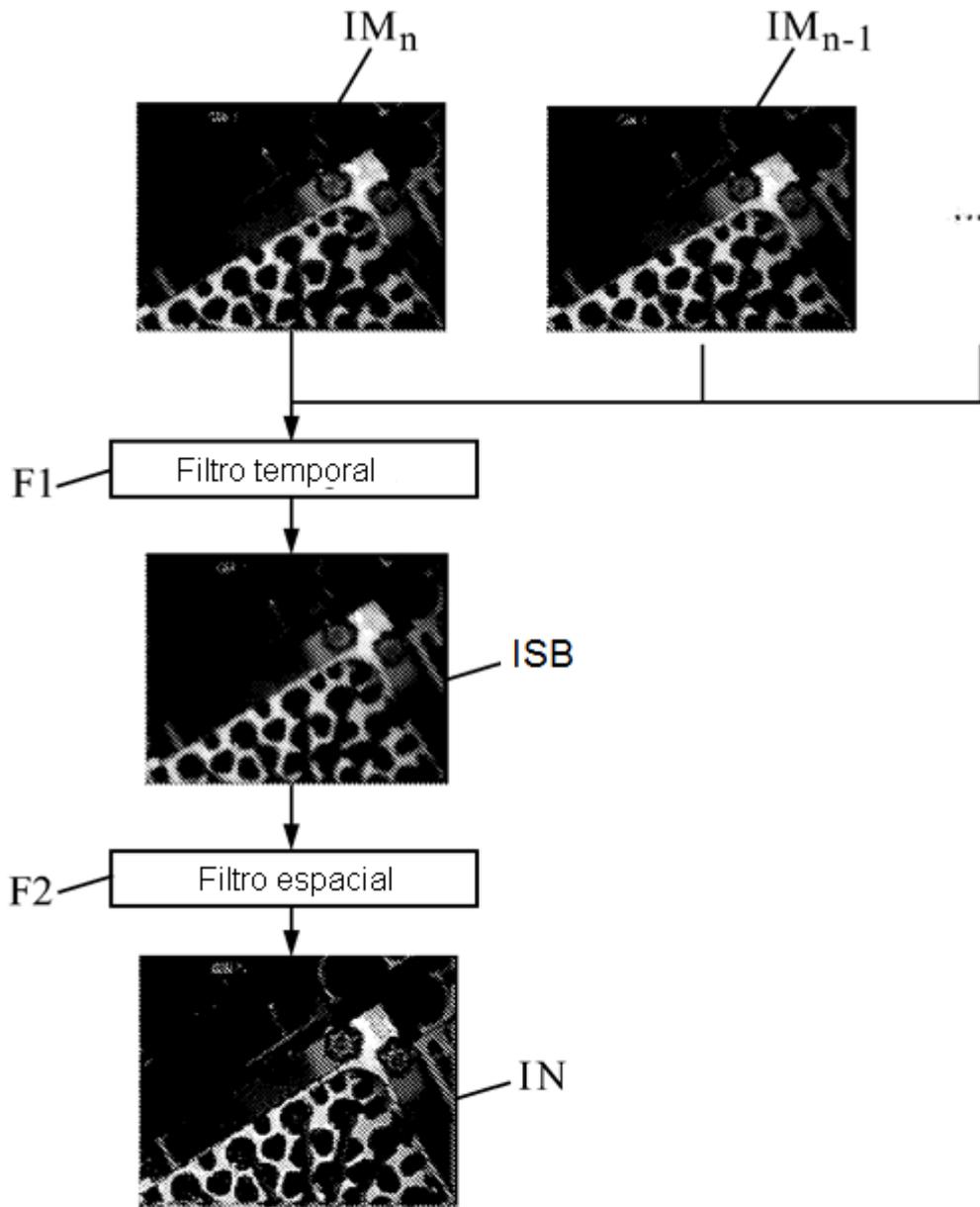


FIG. 2

FIG. 3

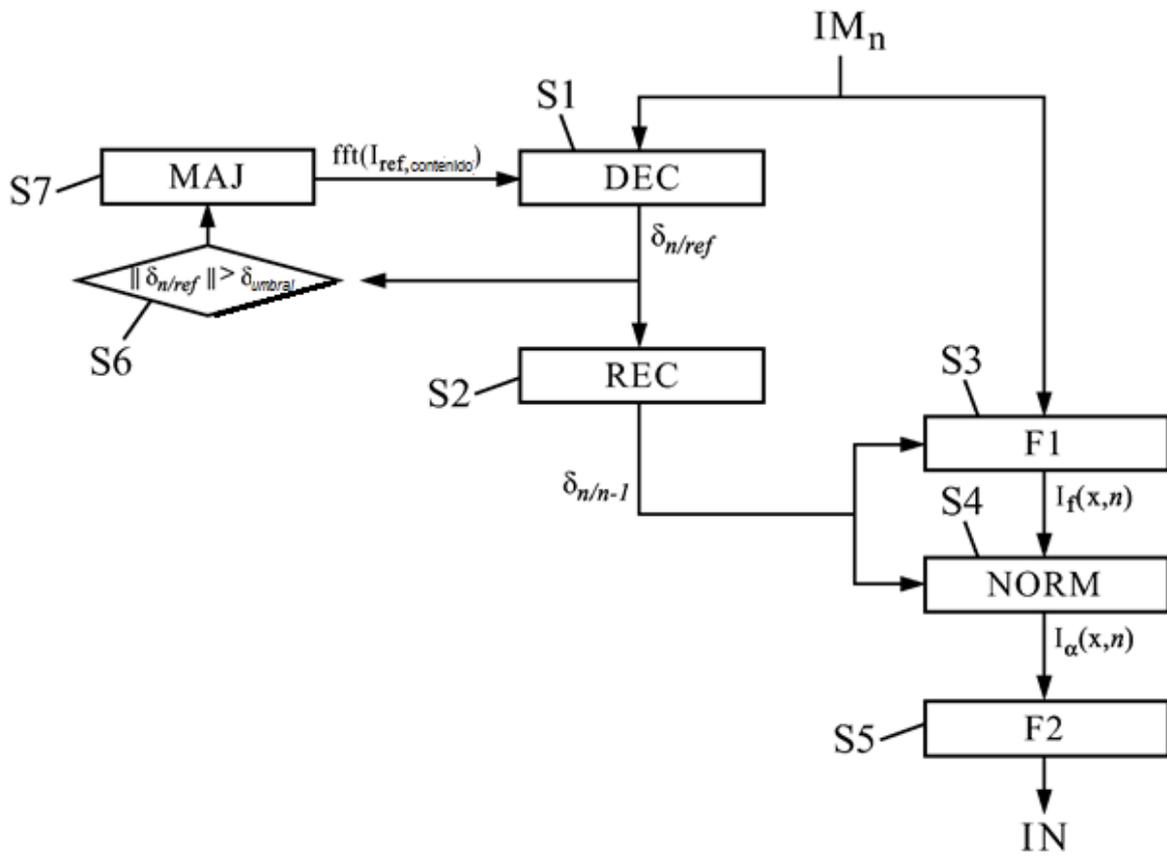


FIG. 4