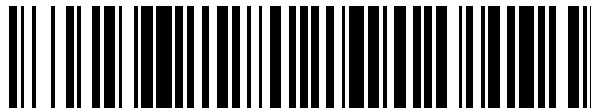


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 717 001**

51 Int. Cl.:

**G06T 11/00** (2006.01)

**G06T 7/00** (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.01.2016 PCT/EP2016/051546**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.09.2016 WO16134903**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.01.2016 E 16701751 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2018 EP 3262611**

54 Título: **Procedimiento de segmentación de la imagen de un objeto reconstruido mediante reconstrucción tridimensional**

30 Prioridad:

**24.02.2015 FR 1551548**

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

**18.06.2019**

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)  
1 & 4 avenue de Bois-Préau  
92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**MOREAUD, MAXIME y  
WAHL, FRANÇOIS**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

ES 2 717 001 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 segmentación de la imagen de un objeto reconstruido mediante reconstrucción tridimensional

5 La presente invención se refiere al campo de la reconstrucción tridimensional de un objeto a partir de medidas externas del objeto, como por ejemplo en el marco de la tomografía electrónica.

10 El término tomografía designa el conjunto de los métodos de reconstrucción exactos, o la mayoría de las veces aproximados, del interior de un objeto a partir de medidas efectuadas en el exterior de este objeto. Estas medidas, llamadas proyecciones por los especialistas en el campo, se vinculan a la absorción por el objeto considerado de una energía emitida por una fuente. A menudo, estas medidas se efectúan por medio de un captador y se realizan bajo diferentes ángulos de medida alrededor del objeto considerado. Las fuentes utilizadas pueden ser de varios tipos: rayos X, rayos gamma o también electrones para la tomografía electrónica.

15 En el campo del refinado petroquímico, la reconstrucción tridimensional se utiliza para caracterizar los soportes de catalizadores. En efecto, las medidas morfológicas de partículas permiten remontarse a las especificidades físico-químicas de los materiales estudiados. Con la ayuda por ejemplo de un MET (Microscopio Electrónico de Transmisión), se realizan una serie de proyecciones, a intervalos angulares regulares. Posteriormente se implementa un método de reconstrucción tomográfica, por ejemplo mediante un enfoque de tipo problema inverso con el fin de obtener una  
20 imagen del soporte considerado.

25 La reconstrucción tridimensional puede utilizarse también en el campo de la exploración y de la explotación petrolífera, para la caracterización de los materiales porosos. En efecto, esta técnica permite tener acceso a la red porosa interna de una muestra de roca y en consecuencia poder caracterizar muy precisamente esta. De ese modo, esta técnica puede permitir acceder a informaciones muy importantes para la caracterización de una roca del yacimiento, tales como su porosidad (densidad de poros en la muestra) o también su permeabilidad (conectividad de los poros entre sí, potencialmente preferentemente en una dirección).

30 Pero la reconstrucción tridimensional de un objeto puede afectar a campos muy diversos: la caracterización de los materiales en general, el control no destructivo o también la captación de imágenes médicas.

35 El objeto reconstruido, o imagen del objeto, se presenta entonces en la forma de un modelo, generalmente representado sobre ordenador, a través de los niveles de intensidad, reflejando cada nivel de intensidad un constituyente del objeto. Por ejemplo, en el caso de un soporte de catalizador, unos niveles de intensidad podrían representar el hueco y otros el material del soporte. Para las rocas, cada constituyente químico puede representarse por unos niveles de intensidad. Los niveles de intensidad se representan clásicamente utilizando una paleta de color en blanco y negro, que conduce a una representación en degradados de gris. El especialista puede buscar entonces simplificar esta información, con el fin de permitir unas caracterizaciones de tipo morfológico o geométrico (volumen, aire, superficie específica, longitud). Se entiende por simplificación, una reducción, sin la intervención de un operario,  
40 del número de niveles de intensidad que representan el objeto reconstruido. Típicamente, un objeto reconstruido se representa por varios millares de niveles de intensidad, que se desea simplificar en dos o tres niveles o clases. Por ejemplo, en el caso de la estimación del volumen poroso de una roca, se podrá ventajosamente simplificar la imagen reconstruida de la muestra de roca considerada en dos clases, una correspondiente al hueco y la otra correspondiente a cualquier constituyente de la roca. Puede implementarse una etapa de simplificación en el caso de que la imagen  
45 del objeto incluya intensidades no enteras, que se reagruparán en un número razonable de clases de intensidades enteras. En el campo técnico considerado, se habla de segmentación para designar esta etapa de simplificación. La segmentación consiste por tanto en determinar unos umbrales de intensidad, que delimitan unas clases de intensidad representativas de una propiedad que se desea destacar.

50 A observar que puede implementarse así una etapa de segmentación sobre una imagen digital de un objeto: la proyección se calcula entonces numéricamente, a partir de la imagen, y no obtenida mediante mediciones experimentales.

**Estado de la técnica**

55 Los documentos siguientes se citarán en el transcurso de la descripción:

[Batenburg et al. 2007] K. J. Batenburg y J. Sijbers. "Optimal threshold selection for tomogram segmentation by reprojection of the reconstructed image", en: Computer Analysis of Images and Patterns, en: Lecture Notes in  
60 Computer Science, vol. 4673, Springer, Berlin/Heidelberg, 563-570, 2007.

[Batenburg et al. 2009] K.J. Batenburg y J. Sijbers. "Adaptive thresholding of tomograms by projection distance minimization". Pattern Recognition, 42(10), 2297-2305, 2009.

[Doan D. H. et al., 2013]: Hong Doan Dinh, Pierre Delage, Jean-François Nauroy, Anh-Minh Tang, Youssef Souhail, Microstructural characterization of a Canadian oil sand, Canadian Geotechnical Journal. 01/2013; 49(10).

65 [Gilbert 1972] Gilbert P., Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. Journal of Theoretical Biology, 36(1): 105-117.

[Huang et al. 1995] L.K. Huang y M.J. Wang, Image thresholding by minimizing the measure of fuzziness, Pattern Recognition, 41-51, 1995.

[Kapur et al. 1985] J.N. Kapur, P.K. Sahoo, A.K.C. Wong. "A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 29(3), 273-285, 1985.

[Lei et al. 2008] Lei He, Zhigang Peng, Bryan Everding, Xun Wang, Chia Y. Han, Kenneth L. Weiss, William G. Wee, A comparative study of deformable contour methods on medical image segmentation, Image and Vision Computing, Volumen 26, Edición 2, 1 de febrero de 2008, Páginas 141-163.

[Mesanovic et al. 2013] Nihad Mesanovic, Haris Huseinagic, Samir Kamenjakovic, Automatic Region Based Segmentation and Analysis of Lung Volumes from CT Images, International Journal of Computer Science and Technology, vol. 4, Edición especial, 2013.

[Moreaud et al. 2008] M. Moreaud, B. Celse, F. Tihay, Analysis of the accessibility of macroporous alumino-silicate using 3D-TEM images. Material Science and Technology 2008 conference, Pittsburgh USA.

[Otsu 1979] N. Otsu. "A threshold selection method from gray level histograms". IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics 9, 62-66, 1979.

[Stawiaski, 2008] Jean Stawiaski, Morphologie mathématique et graphes: application à la segmentation interactive d'images médicales, tesis, Ecole des Mines de Paris, 2008.

[Tran et al. 2013] VD Tran, M Moreaud, É Thiébaud, L Denis, JM Becker, Inverse problem approach for the alignment of electron tomographic series, Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles 69 (2), 279-291. [Tran 2013] V.D. Tran, Reconstruction et segmentation d'image 3D de tomographie électronique par approche

"problème inverse", Tesis, Universidad de Saint Etienne, 2013.

[Xu et al. 1996] L. Xu y M.I. Jordan, "On Convergence Properties of the EM Algorithm for Gaussian Mixture", Neural Computation, 8, 129-151, 1996.

La simplificación o segmentación, de los datos volumétricos sin ninguna intervención manual se efectúa clásicamente con planteamientos globales que utilizan un histograma (no acumulado) de la imagen reconstruida, como por ejemplo: el maximizado de la varianza interclases [Otsu 1979], el maximizado de la entropía [Kapur et al. 1985], el ajuste de las distribuciones gaussianas múltiples en el histograma [Xu et al. 1996], los métodos de nubes dinámicas (o k-medias) [Huang y Wang 1995]. Es igualmente posible utilizar unos enfoques locales de tipo contornos activos [Lei et al. 2008], crecimiento de región [Mesanovic et al. 2013] o también procedentes de la morfología matemática que utiliza el operador de línea de reparto entre aguas [Stawiaski, 2007]. Estos enfoques pueden ser totalmente automáticos, semiautomáticos o guiados por el usuario. Su principal inconveniente consiste en el hecho de que estos métodos utilizan como entrada el objeto reconstruido, que es una aproximación del verdadero objeto, incluyendo errores. Estos métodos no están por lo tanto directamente unidos a las informaciones iniciales sobre el objeto estudiado que son las proyecciones.

Para paliar este problema, un método específico para la tomografía, basado en una optimización global, se ha propuesto recientemente por [Batenburg et al. 2007], y posteriormente por [Tran 2013]. El principio consiste en determinar los valores de los umbrales de intensidad minimizando, a través de un método de optimización iterativo, la diferencia entre las proyecciones reales (es decir las proyecciones realmente registradas por las herramientas de medida de las proyecciones) y las calculadas a partir del objeto reconstruido, y posteriormente segmentado. Este método se conoce por el especialista como el método de minimización de la distancia a las proyecciones. La Figura 1 presenta el principio de este método: a partir de proyecciones reales  $P$ , se reconstruye una imagen  $I$  del objeto estudiado que incluye  $NI$  niveles de intensidades, por ejemplo por reconstrucción tomográfica; posteriormente a partir de valores de umbrales de intensidad  $s$  predefinidos, se calcula, mediante un método de segmentación  $S$ , una imagen segmentada  $IS$  de esta imagen reconstruida  $I$ , que incluye  $NS$  clases de intensidad. Se calculan a continuación unas proyecciones  $P'$  a partir de esta imagen segmentada  $IS$ . Posteriormente, se realiza una comparación  $PCP'$  entre las proyecciones reales  $P$  y unas proyecciones calculadas  $P'$  sobre la imagen segmentada  $IS$ ; se actualizan entonces los valores de los umbrales de intensidad  $s$ , hasta que las proyecciones reales  $P$  y las proyecciones calculadas  $P'$  estén lo más próximas posible, es decir hasta que su diferencia sea inferior a un umbral predefinido.

Este método, aunque permite trabajar sobre las informaciones iniciales en el objeto estudiado, es muy consumidor de tiempo de cálculo. En efecto, para cada iteración del proceso de optimización, es decir con cada actualización  $s+\Delta s$  de los valores de umbrales de intensidad, es necesario recalcular las proyecciones  $P'$  del objeto reconstruido segmentado.

La presente invención se dirige a reducir los tiempos de cálculo para obtener un objeto simplificado mediante el método de minimización de la distancia a las proyecciones. Para hacerlo, la presente invención se basa en un precálculo de las proyecciones calculadas  $P'$ , realizada una única vez, permitiendo evitar el cálculo de las proyecciones calculadas  $P'$  en cada iteración de un proceso de optimización.

### El procedimiento según la invención

De este modo, la presente invención se refiere a un procedimiento para la segmentación de una imagen de un objeto representado por un número finito de niveles de intensidad, siendo esta una imagen tomográfica que se ha reconstruido a partir de medidas externas al objeto y adquiridas según diferentes ángulos tomados con relación a una referencia. A partir de un número predefinido de umbrales de intensidad de dicha imagen, el procedimiento incluye las

etapas siguientes para al menos uno de dichos ángulos:

- 5 a) se determina, para dicho ángulo, una distribución representativa del reparto de dichos niveles de intensidades de dicha imagen, siendo dicha distribución un histograma acumulado de dichos niveles de intensidades encontrados en dicha imagen según una dirección predeterminada en dicha imagen, siendo dicha dirección predeterminada la misma para cada uno de dichos ángulos;
- 10 b) se determinan los valores de dichos umbrales de intensidad minimizando la función objetivo que estima la diferencia entre dicha medida para dicho ángulo y una medida simulada para dicho mismo ángulo, siendo dicha medida simulada función de dichos valores de dichos umbrales y dicha distribución;
- 10 c) se segmenta dicha imagen por reagrupamiento de dichos niveles de intensidad en clases de intensidad delimitadas por dichos valores de dichos umbrales.

Ventajosamente, dicha dirección predeterminada puede ser una recta paralela a uno de los ejes horizontales de dicha imagen.

15 Según un modo de realización de la invención, dichas medidas pueden haberse adquirido en el marco de una geometría de adquisición paralela y dicho histograma acumulado puede determinarse sobre una rotación de dicha imagen según dicho ángulo.

20 Según un modo de implementación de la presente invención, se puede calcular dicha medida simulada  $P'_A$  para uno de dichos ángulos A según una fórmula del tipo:

$$P'_A = f(T_A(s_1), \dots, T_A(s_n), \dots, T_A(s_{NS}))$$

25 en la que  $f$  es una combinación lineal, NS es dicho número predefinido de dichos umbrales de intensidad y  $T_A(s_n)$  es el conjunto de los elementos de dicho histograma acumulado representativos del número de dichos niveles de intensidad de dicha imagen inferiores a un valor de umbral  $s_n$ , siendo calculado dicho histograma para dicho ángulo A.

30 Según un modo de implementación de la presente invención, se puede determinar una intensidad representativa para cada una de dichas clases delimitadas por dichos valores de dichos umbrales.

35 Según un modo de implementación de la presente invención, dicha intensidad representativa de dicha clase puede ser el valor de uno de dichos umbrales que delimitan dicha clase, una media de dichos valores de dichos umbrales que delimitan dicha clase o cualquier combinación lineal de dichos valores de dichos umbrales que delimitan dicha clase.

40 Según un modo de realización de la invención, se pueden aplicar las etapas a) y b) para cada uno de dichos ángulos de medida y se pueden determinar los valores de los umbrales representativos del conjunto de dichos ángulos eligiendo o bien la mediana, o bien una combinación de dichos valores de dichos umbrales determinados para cada uno de dichos ángulos de medida.

45 Según otro modo de realización de la invención, se pueden determinar unos valores de umbrales representativos del conjunto de dichos ángulos de medida minimizando una función objetivo que estima las diferencias entre dichas medidas y dichas medidas simuladas para el conjunto de dichos ángulos de medida.

Además, la invención se refiere a una utilización del procedimiento según la invención para la caracterización de los soportes de catalizadores en el campo del refinado petroquímico.

50 Además, la invención se refiere a una utilización del procedimiento según la invención para la caracterización de los medios porosos en el campo de la exploración y de la explotación petrolífera.

Por otra parte, la invención se refiere a una utilización del procedimiento según la invención para la caracterización de materiales, para el control no destructivo de un objeto o para la captación de imágenes médicas.

55 Además, la invención se refiere a un producto de programa informático descargable desde una red de comunicación o registrado en un soporte legible por ordenador y ejecutable por un procesador, que comprende las instrucciones del código de programa para la implementación del procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

60 **Breve presentación de las figuras**

Otras características y ventajas del procedimiento de acuerdo con la invención, se desprenderán con la lectura de la descripción que sigue de ejemplos no limitantes de realizaciones, haciendo referencia a las figuras adjuntas y que se describen a continuación.

La Figura 1 representa un esquema del principio del método de segmentación por minimizado de la distancia en las proyecciones.

Las Figuras 2A a 2F presentan el principio, según la invención, del cálculo de una distribución representativa del reparto de los niveles de intensidad en una imagen según una línea horizontal, siendo dicha distribución un histograma acumulado.

Las Figuras 3A A3C presentan unos resultados obtenidos mediante el procedimiento según la invención.

### Descripción detallada del procedimiento

Se utilizan las siguientes definiciones en el transcurso de la descripción de la invención:

- proyecciones: en el campo de la reconstrucción tridimensional, se trata de medidas desviadas al exterior del objeto y adquiridas según diferentes ángulos de medida tomados con relación a una referencia. Estas medidas son el resultado de la emisión de una energía emitida por una fuente, parcialmente absorbida por el objeto estudiado, siendo registrada la energía restante por un captador. Las fuentes utilizadas pueden ser de varios tipos: rayos X, rayos gamma o también electrones para la tomografía electrónica. Estas medidas se repiten generalmente para diferentes ángulos de medida tomados con relación a una referencia. En tomografía por rayos X, es corriente utilizar 720 proyecciones, de 360° alrededor del objeto, con incrementos de 0,5°. En tomografía electrónica, las proyecciones se realizan entre -70° y +70°, con incrementos de 1°.
- reconstrucción tridimensional: se trata de una técnica que permite construir la imagen volumétrica de un objeto a partir de proyecciones de este objeto realizadas bajo diferentes ángulos de medida. La reconstrucción conduce una imagen representada por un número finito de niveles de intensidad, correspondiendo cada nivel a un constituyente del objeto. En general, un constituyente se representa por varios niveles de intensidad. Más informaciones con relación a la reconstrucción tridimensional pueden encontrarse en [Doan D. H. et al., 2013].
- geometría de adquisición paralela/no paralela: se trata de la geometría de radiación de la fuente de un dispositivo de adquisición de proyecciones. Se habla de geometría no paralela o también cónica cuando la fuente emite a partir de un punto y los rayos que atraviesan el objeto no son paralelos. Se habla de geometría paralela cuando la fuente emite rayos todos ellos paralelos a partir de una superficie finita y estos rayos atraviesan el objeto según la misma dirección; este es el caso por ejemplo de la tomografía electrónica.
- clase de intensidad: se trata de una reagrupación de varios niveles de intensidad delimitados por al menos un umbral y caracterizados por una intensidad representativa de los valores de intensidad de la clase. Por ejemplo, una clase puede reagrupar los valores de intensidad inferiores a un umbral dado, los valores de intensidad superiores a otro umbral o los valores comprendidos entre dos umbrales. La intensidad representativa de una clase dada puede corresponder a la media de los valores de intensidad de la clase considerada, a la mediana, a uno de los umbrales que caracterizan la clase o también definirse por cualquier otro cálculo.
- segmentación: la segmentación de una imagen representada por un número finito de niveles de intensidad consiste en reagrupar los niveles de intensidad en cuestión en clases de intensidad.

El objeto de la presente invención es un procedimiento de segmentación de la imagen del objeto representado por un número finito de niveles de intensidad. Según la invención, la imagen considerada se ha reconstruido a partir de medidas externas al objeto y adquiridas según diferentes ángulos tomados con relación a una referencia, que puede ser un eje vertical. En lo que sigue y de acuerdo con el uso en el campo, estas medidas se denominan proyecciones. El objeto de la invención se dirige a reagrupar los niveles de intensidad de un número predefinido de clases de intensidad y esto, determinando, de manera automática, rápida y teniendo en cuenta unas proyecciones, los valores de los umbrales de intensidad que delimitan las clases en cuestión.

Previamente a su implementación, el procedimiento según la invención puede requerir la realización de las dos etapas siguientes:

#### 1. adquisición de las proyecciones

Se trata en este caso de adquirir los datos de entrada con el fin de la reconstrucción tridimensional de un objeto. El especialista tiene un perfecto conocimiento de las técnicas de adquisición de las proyecciones asociadas a un objeto.

En el marco de la reconstrucción tridimensional por tomografía electrónica, se pueden obtener este tipo de proyecciones utilizando un Microscopio Electrónico de Transmisión (MET en español, TEM en inglés por Transmission Electron Microscopy). El MET incluye un cañón de electrones que envía un haz paralelo de electrones de alta energía sobre un objeto dispuesto sobre un portaobjetos. El objeto dispersa entonces los electrones que lo atraviesan; saliendo del haz a continuación refocalizado, y posteriormente registrado por un captador. La señal registrada se llama proyección; se indicará por P en lo que sigue. Esta operación se repite inclinando el portaobjetos del microscopio según diferentes ángulos con relación al haz de electrones (típicamente de -70° a +70° con un incremento de 1°). Se obtienen así unas proyecciones P<sub>A</sub> para NA ángulos de medida A. De ese modo, las proyecciones contienen la información volumétrica sobre un objeto, proyectada sobre un plano. El MET permite obtener informaciones sobre un objeto a escala desde algunos nanómetros hasta el angström.

Clásicamente, las proyecciones pueden adquirirse igualmente por rayos X, rayos gamma o similares.

2. reconstrucción tridimensional

5 Se trata en este caso, a partir de las proyecciones  $P_A$  adquiridas en la etapa precedente para diferentes ángulos de medida  $A$ , de reconstruir la imagen tridimensional, es decir volumétrica, de un objeto. El especialista tiene un perfecto conocimiento de las técnicas de reconstrucción tridimensional de un objeto. La reconstrucción puede realizarse por planos de secciones sucesivas, y posteriormente el volumen reconstruido final se obtiene por superposición de las capas reconstruidas. Un método particular de reconstrucción tomográfica se describe por ejemplo en [Tran et al. 2013].  
 10 Se puede citar igualmente el método SIRT [Gilbert, 1972], actualmente utilizado en el campo. La resolución de la imagen del objeto obtenida por reconstrucción tridimensional depende principalmente de la calidad del muestreo en ángulos de medida (gama de ángulos de medida considerada e incremento entre las medidas). De este modo, cuanto más completa sea la cobertura angular y más pequeño sea el incremento angular, más precisa será la imagen del objeto reconstruido, es decir más próxima será la imagen del objeto al objeto real. En el marco de las proyecciones obtenidas por MET, es necesario previamente aplicar una corrección a las proyecciones, debido a un desplazamiento del objeto en el portaobjetos durante las medidas angulares sucesivas.

A partir de un número de umbrales de intensidad predefinido por el especialista, la presente invención incluye al menos las siguientes etapas para un ángulo de medida dado:

- 20 1. Cálculo de una distribución representativa del reparto de los niveles de intensidad: en el transcurso de esta etapa, se determina, para dicho ángulo, una distribución representativa del reparto de dichos niveles de intensidades de dicha imagen según una dirección predeterminada en dicha imagen;
- 25 2. Estimación de los valores de los umbrales intensidad: en el transcurso de esta etapa, se determina el valor de los umbrales de intensidad minimizando la función objetivo que estima la diferencia entre dicha medida para dicho ángulo y una medida simulada para dicho mismo ángulo, siendo dicha medida simulada función del valor de dichos umbrales y de dicha distribución;
- 30 3. Segmentación de la imagen: en el transcurso de esta etapa, se segmenta dicha imagen por reagrupación de dichos niveles de intensidad en clases delimitadas por dichos valores de umbral.

Con unos fines de simplificación, se presentan las principales etapas del procedimiento según la invención en el caso de la imagen de un objeto bidimensional, pero el mismo principio puede ser fácilmente implementado en tres dimensiones por un especialista. De este modo, en lo que sigue, se considera una imagen  $I$  de un objeto en dos dimensiones, de tamaño  $W \times H$ , constituido por  $NI$  niveles de intensidad. Un elemento  $I(i, j)$  (o malla) de la imagen  $I$  es un elemento situado en el cruce de la  $i$ -ésima columna de  $I$  y la  $j$ -ésima línea de  $I$ , variando  $i$  entre 1 y  $W$  y variando  $j$  entre 1 y  $H$ . Un elemento  $I(i, j)$  de la imagen  $I$  contiene un valor de intensidad dado. La imagen  $I$  se ha obtenido por reconstrucción tridimensional a partir de proyecciones  $P_A$  del objeto realizadas bajo un número  $NA$  de ángulos de medida  $A$  diferentes.

Por otra parte, se presentan a continuación las principales etapas del procedimiento según la invención en el caso de la segmentación de una imagen  $I$  en  $NS+1$  clases de intensidad, es decir en el caso general en el que se busca determinar un número  $NS$  de valores de umbrales de intensidad, siendo el número  $NS$  de umbrales un entero superior o igual a 1, predefinido por el especialista.

Se detallan a continuación las principales etapas de la presente invención.

50 1) Cálculo de una distribución representativa del reparto de los niveles de intensidad

En el transcurso de esta etapa, se trata de calcular una distribución representativa del reparto de los niveles de intensidad encontrados en la imagen  $I$  según una dirección predeterminada.

55 Según un modo preferido de realización de la presente invención, dicha distribución es el histograma acumulado  $T$  de los niveles de intensidades encontrados en la imagen  $I$  según una dirección predeterminada. Según un modo de realización de la presente invención, la dirección predeterminada es una recta horizontal en la imagen  $I$ .

Según un modo de realización de la presente invención, se calcula un histograma acumulado  $T_A$  para cada uno de los  $NA$  ángulos de medida.

60 Según un modo de realización para el que las proyecciones se han adquirido a través de una geometría de adquisición paralela, el cálculo de un histograma acumulado  $T_A$  para un ángulo  $A$  dado puede desarrollarse según las dos subetapas siguientes:

65

1.1 Cálculo de una rotación I' de la imagen I según el ángulo A:

Se trata, en un primer tiempo, de calcular una rotación I' de la imagen I para el ángulo de medida A considerado. La imagen I' obtenida tras la rotación de la imagen I tiene las mismas dimensiones que la imagen I.

Según un modo de realización de la presente invención, la rotación I' de una imagen I según un ángulo A puede realizarse de la manera descrita a continuación. Cada punto I'(i', j') de la imagen tras la rotación I' se obtiene a partir de un punto I(i, j) de la imagen I mediante la relación siguiente:

$$I'(i', j') = I(i, j)$$

siendo

$$i = (i' - ic).cos(A) - (j' - jc).sen(A) + ic,$$

$$j = (i' - ic).sen(A) + (j' - jc).cos(A) + jc$$

y (ic, jc) son las coordenadas del centro de la imagen I.

Según un modo de realización de la presente invención, cuando las coordenadas (i, j) no son enteras, se recurre a una interpolación para estimar el valor I(i, j) de la imagen I en el punto (i, j). Según un modo de implementación de la invención, la interpolación utilizada puede ser lineal o utilizar unas funciones B-spline, preferentemente cúbicas. Se indica por Interpolación() la función de interpolación elegida, techo() una función que asocia, a un número real, el entero inmediatamente superior y suelo() una función que asocia, a un número real, el entero inmediatamente inferior, la expresión del valor I(i, j) de la imagen I en el punto (i, j) puede darse de la manera siguiente:

$$I(i, j) = Interpolación(I(techo(j), techo(i)), I(techo(j), suelo(i)), I(suelo(j), techo(i)), I(suelo(j), suelo(i)))$$

1.2 Cálculo del histograma acumulado T de los niveles de intensidad sobre la imagen I'

Posteriormente, en un segundo tiempo, se procede al cálculo del histograma acumulado T<sub>A</sub> de los niveles de intensidad encontrados, c, en la imagen I' obtenida tras la rotación de la imagen I.

Según un modo preferido de implementación de la invención, la dirección favorecida es una recta paralela a una de las líneas j de la imagen I' y se calcula entonces la acumulación de las intensidades a lo largo de una línea j de esta imagen. Se define así un histograma acumulado de dimensión NI x H y un elemento T<sub>A</sub>(i, j) del histograma acumulado que contiene el número de mallas de la línea j de la imagen después de la rotación I' cuya intensidad es inferior o igual a i. Un ejemplo de histograma de las intensidades acumuladas se da en la Figura 2. Las Figuras 2A y 2B muestran el mecanismo de rellenado de la primera línea del histograma acumulado, las Figuras 2C y 2D el mecanismo de rellenado de la segunda línea y las Figuras 2E y 2F el mecanismo de rellenado de la tercera línea. Las Figuras 2A, 2C y 2E presentan los valores de intensidad de la imagen I', compuesta por 3 líneas, 4 columnas y 5 niveles de intensidad enteros que varían de 1 a 5. Las Figuras 2B, 2D y 2F presentan los valores contenidos en el histograma acumulado constituido por 3 líneas y 5 columnas (correspondientes a los 5 niveles de intensidad) después del llenado respectivamente de la primera, de la segunda y la tercera línea. Se pasa por ejemplo de la Figura 2A a la Figura 2B de la manera siguiente: para llenar el elemento T<sub>A</sub>(1,1), se cuenta el número de veces que aparecen unos valores de intensidad inferiores o iguales a 1 en la primera línea de I'; posteriormente se llena el elemento T<sub>A</sub>(2,1) contando el número de veces que aparecen unos valores de intensidad inferiores o iguales a 2 en la primera línea de la imagen I' y se repite un mecanismo de ese tipo para el elemento T<sub>A</sub>(3,1), T<sub>A</sub>(4,1) y T<sub>A</sub>(5,1).

Este precálculo es muy rápido y se realiza en un único barrido de todas las mallas de la imagen I' obtenida tras la rotación de la imagen I. Además, el histograma acumulado resultante se organiza en función de umbrales posibles para la imagen I' puesto que un elemento T<sub>A</sub>(i, j) se rellena directamente sobre las mallas de la línea j de la imagen I' cuyos valores son como máximo iguales al valor del umbral i.

De manera general, se define por T<sub>A</sub>(s<sub>n</sub>) el conjunto de los elementos del histograma acumulado representativos del número de niveles de intensidad de la imagen I' inferiores a un valor de umbral s<sub>n</sub>. En el caso de una imagen 2D y en el caso en que dicha dirección favorecida sea una recta paralela a una de las líneas j de la imagen I', T<sub>A</sub>(s<sub>n</sub>) corresponde a la s<sub>n</sub>ésima columna del histograma acumulado T<sub>A</sub>. En el caso de una imagen 3D, T<sub>A</sub>(s<sub>n</sub>) puede corresponder a un plano en el histograma acumulado T<sub>A</sub>.

Según un modo de realización de la presente invención para el que las proyecciones se han adquirido a través de una geometría de adquisición no paralela, se define una matriz de proyección función del ángulo de medida A considerado y que pone en relación cada punto de la imagen I con un elemento del histograma acumulado T<sub>A</sub>. Posteriormente se recorre cada punto de la imagen I para llenar el histograma acumulado T<sub>A</sub> de la misma manera que en el caso de la geometría de adquisición paralela descrito anteriormente.

2) Estimación de los valores de los umbrales de intensidad

En el transcurso de esta etapa, se trata de determinar de manera automática un número NS de valores de umbrales de intensidad de una imagen I, siendo el número NS de umbrales un entero superior o igual a 1, predefinido por el especialista. Según la invención, este problema se resuelve buscando los NS valores de umbrales que permiten

minimizar una función objetivo F que mide al menos la diferencia entre la proyección P real según el ángulo A y la proyección P'A simulada para dicho ángulo A y calculada a partir de la distribución representativa de los niveles de intensidades en la imagen I.

Según un modo de realización de la presente invención, se calcula una proyección P'A de ángulo A simulada a partir del histograma acumulado T<sub>A</sub> de ángulo A en un modo de realización de la etapa anterior según una fórmula del tipo:

$$P'_A = f(T_A(s_1), \dots, T_A(s_n), \dots, T_A(s_{NS}))$$

en la que f es una combinación lineal, T<sub>A</sub>(s<sub>n</sub>) es el conjunto de los elementos del histograma acumulado T<sub>A</sub> de ángulo A representativos del número de niveles de intensidad de la imagen como máximo iguales a un umbral s<sub>n</sub>, variando n de 1 a NS.

Según un modo de realización de la presente invención, se calcula la proyección P'A de ángulo A simulada a partir del histograma acumulado T<sub>A</sub> de ángulo A calculado en un modo de realización de la etapa anterior de la manera siguiente:

- en el caso de un único umbral s<sub>1</sub>, (caso en el que NS=1):

$$P'_A(j) = c_1^* \cdot T_A(j, s_1) + c_2^* \cdot (W - T_A(j, s_1))$$

- en el que c<sub>1</sub><sup>\*</sup> y c<sub>2</sub><sup>\*</sup> son las intensidades representativas de las dos clases delimitadas por el umbral s<sub>1</sub>; - en el caso de dos umbrales s<sub>1</sub> y s<sub>2</sub>, siendo s<sub>1</sub> < s<sub>2</sub> (caso en el que NS=2):

$$P'_A(j) = c_1^* \cdot T_A(j, s_1) + c_2^* \cdot [T_A(j, s_2) - T_A(j, s_1)] + c_3^* \cdot [W - T_A(j, s_2)]$$

- En el que c<sub>1</sub><sup>\*</sup>, c<sub>2</sub><sup>\*</sup> y c<sub>3</sub><sup>\*</sup> son las intensidades representativas de las tres clases delimitadas por los umbrales s<sub>1</sub>, y s<sub>2</sub>; en el caso de NS umbrales s<sub>1</sub> a s<sub>NS</sub>, siendo s<sub>n</sub> < s<sub>n+1</sub> y variando n de 1 a NS:

$$P'_A(j) = c_1^* \cdot T_A(j, s_1) + c_2^* \cdot [T_A(j, s_2) - T_A(j, s_1)] + \dots + c_{n+1}^* \cdot [T_A(j, s_{n+1}) - T_A(j, s_n)] + \dots + c_{NS+1}^* \cdot [W - T_A(j, s_{NS})]$$

en la que c<sub>1</sub> a c<sub>NS+1</sub> son las intensidades representativas de las NS+1 clases delimitadas por los umbrales s<sub>1</sub> a s<sub>NS</sub>.

Según un modo de realización de la presente invención, se utiliza un método de los mínimos cuadrados para determinar los NS umbrales de intensidad buscados para una proyección P<sub>A</sub> de ángulo A dado. De manera más precisa, se determinan los NS umbrales de intensidad para una proyección P<sub>A</sub> de ángulo A dado que minimiza una diferencia entre la proyección P<sub>A</sub> efectivamente medida y la proyección P'A simulada tal como se ha descrito anteriormente. La función objetivo que describe este problema inverso puede escribirse entonces de la siguiente manera:

$$F = \sum_{j=1}^H (P'_A(j) - (P_A(j)))^2 \quad (1)$$

La función objetivo así definida no es lineal con relación a los umbrales de intensidad. Por consiguiente, no existe un método directo para obtener los valores de los umbrales de intensidad buscados. Según un modo de realización de la presente invención, se determinan los valores de umbral de intensidad óptimos mediante un método de ensayo y error. Esto significa que se evalúa la función objetivo para diferentes combinaciones de valores de los NS umbrales y se conserva la combinación de valores de los NS umbrales que conduce a un valor mínimo de la función objetivo. La utilización de un método de ensayo y error puede utilizarse ventajosamente en el caso en que se han de determinar solo 1 o 2 umbrales. De este modo, en el caso de un único umbral s<sub>1</sub>, se pueden ensayar todos los valores de umbrales posibles y guardar aquel para el que la función objetivo es mínima. En el caso de 2 umbrales s<sub>1</sub> y s<sub>2</sub>, se puede fijar por ejemplo un valor para s<sub>1</sub>, después hacer variar s<sub>2</sub> para todos los valores posibles salvo aquel tomado por s<sub>1</sub>, y calcular el valor de la función objetivo para cada par (s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>); posteriormente se repite este proceso para todos los valores posibles de s<sub>1</sub>. Los valores de umbrales mantenidos para una segmentación óptima de la imagen del objeto considerado son entonces los de la combinación (s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>) que ofrece un valor mínimo de la función objetivo. La posibilidad de ensayar un gran número de combinaciones posibles para los valores de los NS umbrales buscados mediante un método de ensayo y error se hace posible gracias al precálculo basado en la estimación de una distribución representativa de las intensidades tal como se ha definido en la etapa anterior. En efecto, este precálculo se efectúa una única vez y la expresión de la proyección simulada P'A en función de este precálculo permite tener un acceso rápido a las proyecciones simuladas P'A, para cualquier combinación de valores de umbrales, contrariamente a la técnica anterior que debe simular numéricamente las proyecciones P'A (lo que es costoso en tiempo de cálculo)



y esto, lo que es más, en cada iteración del proceso de optimización, (es decir en cada combinación de umbrales ensayada). Según otro modo de realización de la presente invención, se ha recorrido un método de minimización de la función objetivo basada en un planteamiento iterativo. De manera más precisa, se utiliza un método que, a partir de una función objetivo calculada sobre un modelo inicial (en este caso un valor inicial para cada uno de los NS umbrales), modificará este modelo (es decir los valores de los NS umbrales), iteración tras iteración, hasta encontrar un mínimo de la función objetivo. Son conocidos para el especialista numerosos algoritmos de minimización de la función objetivo, tal como el método de Gauss-Newton, el método de Newton-Raphson o también el gradiente conjugado.

Según un modo de implementación de la presente invención, una vez determinados los NS umbrales, se pueden calcular las NS+i intensidades representativas de cada una de las NS+i clases inducidas por los NS umbrales de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} c_1^* \\ \dots \\ c_{NS+1}^* \end{pmatrix} = ({}^t XX)^{-1t} XP,$$

siendo calculada la matriz X de la siguiente manera:

en el caso de un único umbral  $s_1$

$$X = [T(j, s)/W, 1 - T(j, s)/W]$$

en el caso de dos umbrales  $s_1$  y  $s_2$

$$X = W[T(j, s_1)/W, T(j, s_2)/W - T(j, s_1)/W, 1 - T(j, s_2)/W]$$

en el caso de NS umbrales  $s_1$  a  $s_{NS}$ :

$$X = W[T(j, s_1)/W, T(j, s_2)/W - T(j, s_1)/W, \dots, T(j, s_{i+1})/W - T(j, s_i)/W, \dots, 1 - T(j, s_n)/W]$$

Al final del proceso de minimizado, se obtienen NS valores para los NS umbrales de intensidad buscados, así como los NS+i valores de las intensidades representativas de las NS+i clases delimitadas por los NS umbrales de intensidad.

Según un modo de realización de la presente invención, se calculan unos valores de umbrales de una imagen de un objeto independientemente para cada proyección  $P_A$  tal como se ha descrito anteriormente, es decir para cada ángulo de medida A considerado. Preferentemente, se calcula un mismo número NS de umbrales cualquiera que sea el ángulo de medida considerado.

Según un modo de realización, se calculan los valores de umbrales óptimos para el conjunto de los NA ángulos considerados, tomando por ejemplo uno de los umbrales estimados, o bien la media, la mediana o cualesquiera otras combinaciones de todos o parte de los umbrales obtenidos para cada proyección.

Según otro modo de realización de la presente invención, se determinan los NS umbrales de intensidad para el conjunto de los ángulos de medida minimizando la función de coste siguiente:

$$F = \sum_{A=1}^{NA} \sum_{j=1}^H (P'_A(j) - P_A(j))^2$$

es decir que se determinan los NS valores de umbrales para el conjunto de los ángulos A considerados resolviendo un problema de optimización global, cubriendo todos los ángulos y no resolviendo un problema de optimización ángulo por ángulo.

### 3) Segmentación de la imagen I

En el transcurso de esta etapa, se segmenta la imagen del objeto reconstruido reagrupando los NI niveles de intensidad de la imagen en cuestión en NS+1 clases delimitadas por los NS umbrales determinados en el transcurso de la etapa anterior. De este modo, para cada malla (i, j) de una imagen de un objeto, se busca a qué clase considerada pertenece la malla, en función de los valores de los umbrales determinados en la etapa anterior.

Según un modo de implementación de la presente invención, se atribuye a cada malla una intensidad representativa de la clase a la que pertenece. La intensidad representativa en cuestión puede ser la media de los umbrales que delimitan dicha clase o también uno de dichos umbrales, o también cualquier combinación de dichos umbrales.

Según un modo de realización de la presente invención, se atribuye a cada clase de intensidad los valores  $c_1$  a  $c_{N+1}$  de las intensidades representativas de las  $NS+1$  clases determinadas según un modo de realización de la etapa anterior. Por ejemplo, en el caso en el que  $NS=1$ , si el elemento  $I(i, j)$  tiene un valor inferior a un valor de umbral de intensidad  $s_1$ , entonces se atribuye a  $I(i, j)$  el valor de la intensidad representativa  $c_1^*$ . Y en el caso de  $NS=2$ , si  $s_1 < I(i, j) < s_2$ , entonces se atribuye a  $I(i, j)$  el valor de la intensidad representativa  $c_2^*$ . Se obtiene así una imagen segmentada en  $NS+1$  clases de intensidad y caracterizada por unos valores de intensidad que pertenecen al conjunto  $\{c_1^*, \dots, c_n^*, \dots, c_{NS+1}^*\}$ .

Además, la invención se refiere a un producto de programa informático descargable desde una red de comunicación y/o registrado en un soporte legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador, en el que comprende unas instrucciones de código de programa para la implementación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

### Utilización de la invención

La invención se refiere igualmente a la utilización del procedimiento según la invención para la caracterización de los soportes de catalizadores en el campo del refinado petroquímico. En efecto, la segmentación de la imagen de un soporte de catalizador obtenida según la invención puede contribuir a caracterizar mejor las especificidades fisicoquímicas de los materiales constitutivos de dicho soporte.

La invención puede referirse igualmente a la utilización del procedimiento según la invención en el campo de la exploración y la explotación petrolífera, para la caracterización de los medios porosos. En efecto, la segmentación de la imagen de una muestra de roca, procedente por ejemplo de una roca de yacimiento de un campo petrolífero, puede contribuir a una mejor caracterización de esta muestra de roca (mejor conocimiento de su porosidad, de su permeabilidad, etc.) y en consecuencia puede contribuir a mejorar la explotación del campo petrolífero estudiado.

La invención puede referirse igualmente a la utilización del procedimiento según la invención para la caracterización de materiales cualesquiera, para el control no destructivo de un objeto o también para la captación de imágenes médicas.

### Ejemplo de aplicación

La presente invención se aplica a un objeto sintético (es decir a un objeto para el que se conoce la solución exacta de una segmentación) que incluye dos niveles de intensidad (Figura 3A). La Figura 3B presenta la imagen  $I$  reconstruida con ayuda del método de reconstrucción tomográfico SIRT, conocido por el experto en la materia y descrito en [Gilbert, 1972], a partir de 140 proyecciones  $P$  del objeto estudiado, obtenidas para unos ángulos que varían entre  $0^\circ$  y  $139^\circ$  en pasos de  $1^\circ$ . La imagen reconstruida presenta 255 niveles de intensidad. Se pueden observar unas imperfecciones en esta imagen (efecto desenfoque), debido a la reconstrucción de un objeto a partir de un número restringido de informaciones sobre este objeto. La Figura 3C presenta el resultado del proceso según la invención aplicado a la imagen  $I$  e implementado en el caso de un único umbral de intensidad. Se observa que el resultado del procedimiento según la invención conduce claramente a la simplificación de la imagen estudiada en dos clases bien distintas. De este modo, el procedimiento según la invención aplicado a este ejemplo permite corregir el defecto de resolución de la imagen reconstruida (Figura 3B), siendo la imagen simplificada (Figura 3C) más próxima al objeto a encontrar (Figura 3A).

De este modo, el procedimiento según la invención permite una determinación automática y rápida de los valores de los umbrales de intensidad óptimos y simplificar así de manera fiable la imagen de un objeto obtenido mediante reconstrucción tridimensional. La presente invención permite acelerar la etapa de segmentación por minimizado de la distancia en las proyecciones mediante un precálculo efectuado sobre la imagen del objeto reconstruido, suprimiendo así los cálculos de proyecciones simuladas para cada combinación de umbrales ensayada, y posteriormente propone un método que utiliza este precálculo para calcular de manera óptima unos valores de umbrales.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la segmentación de una imagen de un objeto representado por un número finito de niveles de intensidad, siendo dicha imagen una imagen tomográfica que se ha reconstruido a partir de medidas externas al objeto y adquiridas según diferentes ángulos tomados con relación a una referencia, caracterizado por que se realizan, a partir de un número predefinido de umbrales de intensidad de dicha imagen, las etapas siguientes para al menos uno de dichos ángulos:

a) se determina, para dicho ángulo, una distribución representativa del reparto de dichos niveles de intensidades de dicha imagen, siendo dicha distribución un histograma acumulado de dichos niveles de intensidades encontrados en dicha imagen según una dirección predeterminada en dicha imagen, siendo dicha dirección predeterminada la misma para cada uno de dichos ángulos;

b) se determinan los valores de dichos umbrales de intensidad minimizando la función objetivo que estima la diferencia entre dicha medida para dicho ángulo y una medida simulada para dicho mismo ángulo, siendo dicha medida simulada función de dichos valores de dichos umbrales y dicha distribución;

c) se segmenta dicha imagen por reagrupamiento de dichos niveles de intensidad en clases de intensidad delimitadas por dichos valores de dichos umbrales.

2. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que dicha dirección predeterminada es una recta paralela a uno de los ejes horizontales de dicha imagen.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dichas medidas se han adquirido en el marco de una geometría de adquisición paralela y en el que dicho histograma acumulado se determina sobre una rotación de dicha imagen según dicho ángulo.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se calcula dicha medida simulada  $P'_A$  para uno de dichos ángulos A según una fórmula del tipo:

$$P'_A = f(T_A(s_1), \dots, T_A(s_n), \dots, T_A(s_{NS}))$$

en la que  $f$  es una combinación lineal, NS es dicho número predefinido de dichos umbrales de intensidad y  $T_A(s_n)$  es el conjunto de los elementos de dicho histograma acumulado representativos del número de dichos niveles de intensidad de dicha imagen inferiores a un valor de umbral  $s_n$ , siendo calculado dicho histograma para dicho ángulo A.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina una intensidad representativa para cada una de dichas clases delimitadas por dichos valores de dichos umbrales.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que dicha intensidad representativa de dicha clase es el valor de uno de dichos umbrales que delimitan dicha clase, una media de dichos valores de dichos umbrales que delimitan dicha clase o cualquier combinación lineal de dichos valores de dichos umbrales que delimitan dicha clase.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se aplican las etapas a) y b) para cada uno de dichos ángulos de medida y se determinan unos valores de umbrales representativos del conjunto de dichos ángulos eligiendo o bien la mediana, o bien una combinación de dichos valores de dichos umbrales determinados para cada uno de dichos ángulos de medida.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determinan unos valores de umbrales representativos del conjunto de dichos ángulos de medida minimizando una función objetivo que estima las diferencias entre dichas medidas y dichas medidas simuladas para el conjunto de dichos ángulos de medida.

9. Utilización del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8 para la caracterización de los soportes de catalizadores en el campo del refinado petroquímico.

10. Utilización del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8 para la caracterización de los medios porosos en el campo de la exploración y de la explotación petrolífera.

11. Utilización según una de las reivindicaciones 1 a 8 para la caracterización de materiales, para el control no destructivo de un objeto o para la captación de imágenes médicas.

12. Producto de programa informático descargable desde una red de comunicación o registrado en un soporte legible por ordenador y ejecutable por un procesador, que comprende unas instrucciones de código de programa para la implementación del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

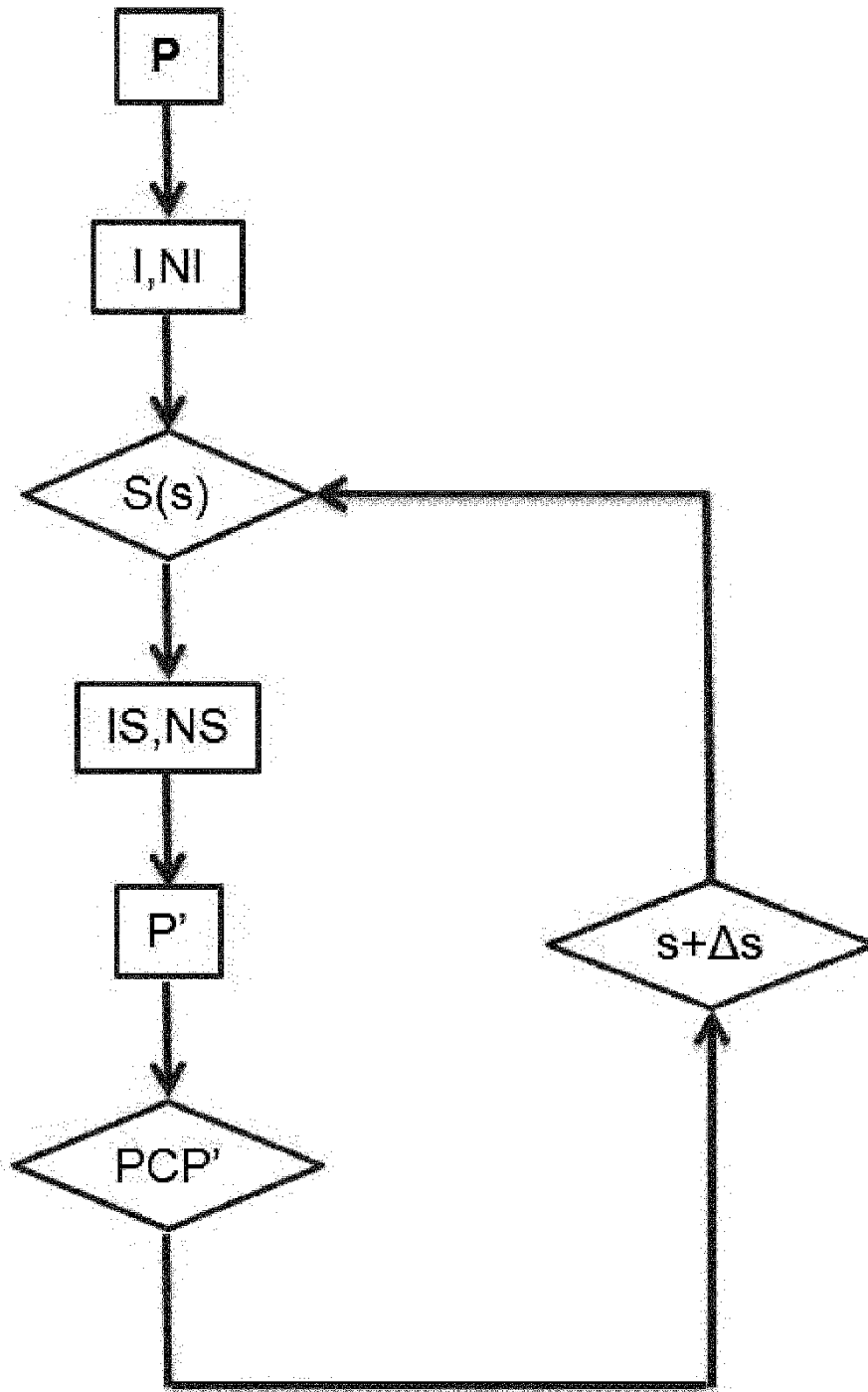
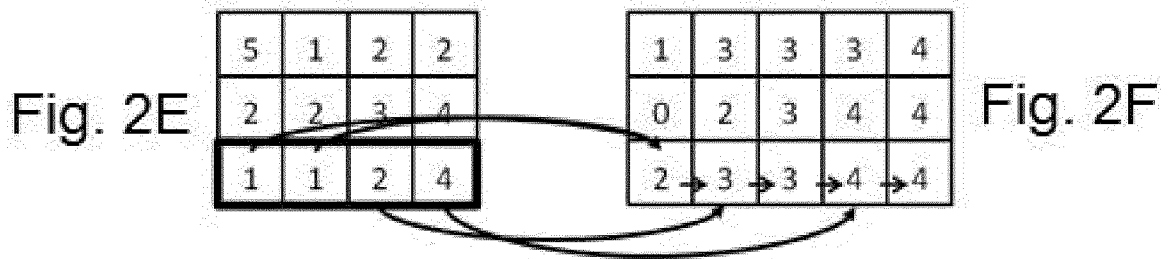
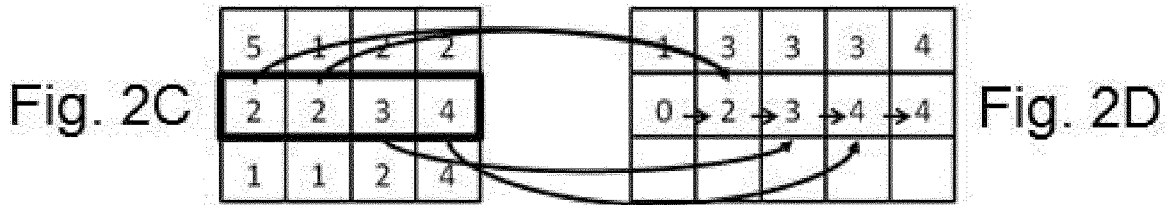
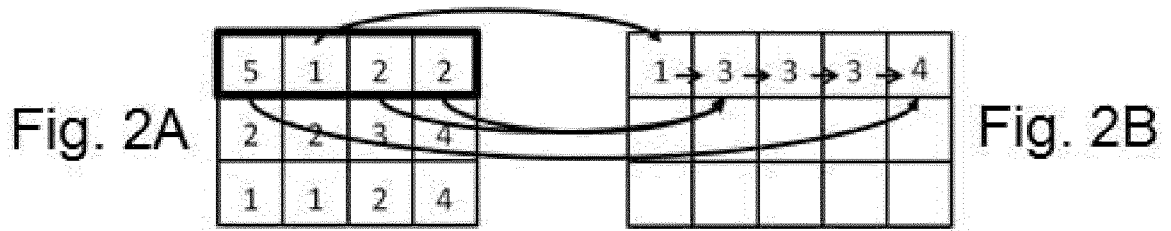


FIG. 1



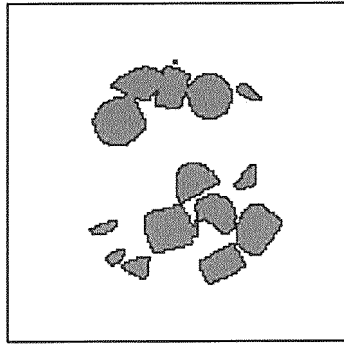


Fig. 3A

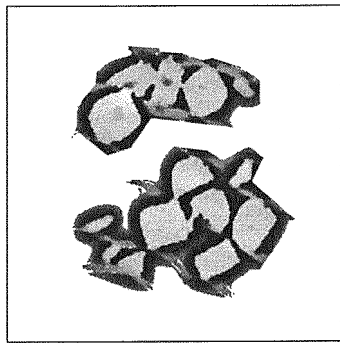


Fig. 3B

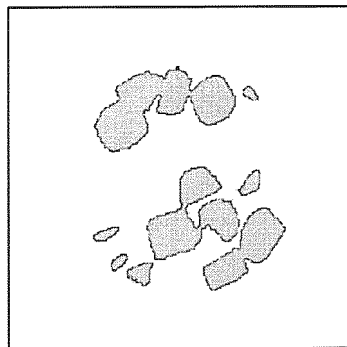


Fig. 3C