



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11) Número de publicación: 2 656 862

51 Int. Cl.:

G06T 7/20 (2007.01) **G01C 21/16** (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: 30.03.2007 E 07290386 (7)
 (97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: 01.11.2017 EP 1843295

(54) Título: Procedimiento de restitución de movimientos de la línea de visión de un instrumento óptico

(30) Prioridad:

03.04.2006 FR 0602904

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente: 28.02.2018

(73) Titular/es:

AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS (100.0%) 51-61 Route de Verneuil 78130 Les Mureaux, FR

(72) Inventor/es:

CROMBEZ, VINCENT; POLVERINI, UMBERTO y FLANDIN, GRÉGORY

(74) Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de restitución de movimientos de la línea de visión de un instrumento óptico

Sector de la técnica

La invención se refiere al campo de explotación de una secuencia de imágenes sucesivas proporcionadas por un instrumento de observación óptica montado en un portador animado por un movimiento tal que las imágenes sucesivas representan una banda de una escena observada, con un solapamiento entre imágenes.

La invención encuentra una aplicación particularmente importante, si bien no exclusiva, en la explotación en tiempo diferido de las imágenes proporcionadas por un instrumento de observación de la tierra instalado en un satélite o una aeronave que se desplaza siguiendo una trayectoria sustancialmente conocida.

15 Estado de la técnica

10

20

La reconstitución de las variaciones en la orientación de la línea de visión del instrumento en el transcurso de las capturas de fotogramas sucesivas es esencial para la utilización de las imágenes obtenidas, con el fin de restituir la geometría y poder localizar los objetos observados en un punto de georeferencia con el grado de precisión deseado.

La restitución de la orientación en cada captura de fotogramas con respecto a un punto de referencia es necesario, en particular, para tener un buen rendimiento en el caso de satélites que utilizan un instrumento de captura de fotogramas en el dominio visible/IR.

- Para cada captura de fotograma, el instrumento se orientará y estabilizará en una dirección dada, eventualmente con una pequeña velocidad de rotación residual controlada por el usuario. Durante las capturas de fotogramas, la información proporcionada por los detectores en forma de tiras se almacenará, luego se retransmitirá y tratará en el suelo con el fin de reconstituir unas imágenes bidimensionales de las zonas observadas.
- La reconstitución de estas imágenes precisa la restitución de los movimientos de la línea de visión durante la captura de fotogramas, al no ser ésta absolutamente estable durante las capturas de fotogramas, debido a los movimientos residuales de balanceo, cabeceo y guiñada del satélite y esto en un intervalo de frecuencia que puede llegar hasta varias centenas de Hercios debido a las interferencias de alta frecuencia (vibraciones generadas por ciertos equipos). Además, se deben tener en cuenta unos efectos meramente geométricos. Por ejemplo, la captura de fotogramas de una banda de terreno que presenta un relieve accidentado no necesariamente conocido conlleva unos efectos diferentes en las variaciones de la línea de visión según la altitud del punto observado.

Según el estado de la técnica, la determinación de la orientación y de los movimientos angulares de la línea de visión en todo momento durante las capturas de fotogramas se realiza gracias a la utilización de sensores de 40 posición y velocidad angulares, tales como unos sensores estelares y giroscopios. No obstante, el aumento de la resolución de los instrumentos exige una restitución de actitud cada vez más precisa, difícil de alcanzar con tales sensores. En efecto, los sensores de estrellas ofrecen una precisión de medición de actitud muy elevada, pero en una gama de frecuencias relativamente baja (típicamente inferior a unos Hercios). Los giroscopios están también limitados en cuanto al ancho de banda (típicamente inferior a unas decenas de Hercios), con frecuencia debido a su 45 electrónica. Por otra parte, estos dos tipos de sensores no proporcionan una medición directa de la línea de visión del instrumento, puesto que, por naturaleza, solo proporcionan información sobre su propia orientación. Esto resulta particularmente limitador cuando se trata de restituir los movimientos de una línea de visión de alta frecuencia, típicamente de 50-150 Hercios, ya que las vibraciones a estas frecuencias afectan directamente a la línea de visión del instrumento y a los propios sensores. El documento FR 2.828.314 divulga un procedimiento de estabilización 50 electrónica de imágenes de una escena para un aparato de captura de fotogramas según el estado de la técnica, en el que se filtran las imágenes de la escena para retener tan solo las bajas frecuencias espaciales. La presente invención tiene por objeto proporcionar un procedimiento y un dispositivo de medición y de restitución de los movimientos de la línea de visión de un instrumento óptico y de la orientación de la línea de visión para cada captura de fotograma con respecto a un punto de referencia inicial y ello, sin utilizar necesariamente las mediciones de 55 sensores externos de posición y velocidad angular, sino, más bien, utilizando directamente las imágenes capturadas por el propio instrumento.

Objeto de la invención

Con esta finalidad, la invención propone, concretamente, un procedimiento de restitución de los movimientos de una línea de visión en balanceo, cabeceo y guiñada de un instrumento de observación durante la captura de un fotograma, según el cual, a partir del instrumento montado sobre un portador que se está desplazando, se forman, durante el tiempo de duración [Ti, Tf] de la captura de fotograma, al menos dos imágenes que contienen una misma parte de una escena, estando las capturas de estas dos imágenes desfasadas en el tiempo por un valor conocido T sustancialmente constante, y se determinan dichos movimientos de la línea de visión (V) del instrumento en el transcurso de la captura de fotograma al menos mediante las siguientes etapas:

a) una etapa de selección y concordancia de varias zonas características, homólogas, capturadas en las inmediaciones de los momentos Tn y Tn + T (n= 1 a N) respectivamente, distribuidos entre Ti y Tf en dichas imágenes de la misma parte de la escena, de manera que se obtenga una medición de la posición en los momentos Tn y Tn+T (n=1 a N) respectivamente, de dichas zonas homólogas o de al menos un punto particular de estas zonas, en cada una de las dos imágenes de dicha parte,

5

10

15

25

60

- b) una etapa de cálculo de las variaciones angulares de la línea de visión del instrumento entre los momentos Tn y Tn+T (n=1 a N) mediante el reajuste de un modelo de concordancia de las imágenes, dando dicho modelo para cualquier punto de una primera imagen capturada en el momento Tn (n=1 a N), una estimación de la posición de su punto homólogo en una segunda imagen capturada en el momento Tn+T en función de parámetros que comprenden, en particular, la orientación de la línea de visión del instrumento en el momento Tn y dichas variaciones angulares de esta línea de visión entre Tn y Tn + T, consistiendo el reajuste del modelo en calcular los valores de dichas variaciones angulares que minimizan una función, por ejemplo, cuadrática, unas desviaciones entre la posición de las zonas homólogas de la segunda imagen predichas por el modelo y la posición de dichas zonas homólogas de la segunda imagen tal y como se ha restituido en la etapa (a), y
 - c) una etapa de reconstitución de los movimientos de la línea de visión en el horizonte de tiempos [Ti, Tf] por integración, filtrado y eventualmente remuestreo del conjunto de variaciones elementales reconstituidas en la etapa (b).
- 20 Se entiende por "zona característica", por ejemplo, una parte de la escena, de típicamente unas centenas de píxeles, que contiene información radiométrica (luminancia y/o crominancia), geométrica o textural que la vuelve adecuada para una concordancia. Se entiende por "punto característico" un punto cuyo entorno inmediato es una zona característica en el sentido anterior. En la práctica, esto conlleva utilizar como zonas características unos emplazamientos cuyas derivadas locales de segundo orden de la radiometría son nulas en dos direcciones distintas.
 - La etapa (a) puede implementar una concordancia de zonas características de imágenes basada en un parecido geométrico, radiométrico o textural entre al menos dos imágenes adquiridas durante la captura de fotograma.
- El procedimiento, tal como se ha definido anteriormente, permite obtener una restitución relativa de la línea de visión, con respecto a un punto de referencia inicial; esta restitución relativa es suficiente para responder a las necesidades habituales, es decir, al suministro de información que permita tener en cuenta la alteración de las longitudes, superponer bandas espectrales, tener en cuenta la altimetría y superponer imágenes procedentes de varios sensores del instrumento sensibles en diferentes bandas espectrales.
- Pero también es posible implementar el procedimiento anterior para determinar la orientación de la línea de visión de manera absoluta en el espacio inercial, completando las indicaciones proporcionadas por el instrumento y los medios de cálculo asociados con las indicaciones proporcionadas, a unos intervalos de tiempo que pueden ser importantes, por un sensor absoluto de precisión, tal como un sensor estelar.
- 40 El procedimiento se basa en la concordancia de puntos o zonas de la imagen, que pueden ser: característicos (en el sentido expuesto anteriormente), predeterminados independientemente de la imagen en las inmediaciones, con o sin conocimiento previo, de elementos particulares presentes en la escena, seleccionados de un subconjunto de puntos o zonas característicos.
- 45 En particular, se utiliza al menos uno de los siguientes métodos para seleccionar las zonas características asociadas con una fecha de captura de fotograma Tn dada:
 - selección de los puntos con doble gradiente superior a un umbral dado en una zona de la imagen correspondiente a la captura de fotograma efectuada en las inmediaciones del momento Tn;
- selección de puntos con unas posiciones predeterminadas independientemente del contenido de la imagen en las inmediaciones de estos puntos, con un rechazo eventual de los puntos para los que un criterio de calidad de concordancia sea inferior a un umbral dado;
 - selección de puntos predeterminados dada por un conocimiento previo de elementos particulares presentes en la escena;
- selección de un subconjunto de puntos a partir de un conjunto de puntos característicos calculados mediante uno de los métodos anteriores o uno similar, de manera que se maximice la distribución espacial de dichos puntos y la calidad de la concordancia de las zonas características en las inmediaciones de estos puntos;
 - selección de una viñeta de típicamente unas decenas a unas centenas de píxeles en las inmediaciones de los puntos con el fin de mejorar la calidad de la concordancia.

Las imágenes concordadas se capturan en unas bandas espectrales que pueden ser idénticas o diferentes. La calidad de concordancia (por ejemplo, basándose en una medición de correlación) es un criterio importante en la etapa de reajuste del modelo geométrico.

La etapa de concordancia puede implementarse mediante unos procedimientos clásicos de registro, tal como, por ejemplo, el descrito en el artículo de KIM S P ET AL: "Subpixel accuracy image registration by spectrum

cancellation"; Image and multidimensional signal processing. MINEAPOLIS, APR. 27-30, 1993, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP), NUEVA YORK.

- 5 En particular, en la etapa (b), cuando se utiliza una función cuadrática de las desviaciones, dichas desviaciones que intervienen en el criterio cuadrático que se ha de minimizar se ponderan mediante un escalar positivo proporcional a la calidad estimada de dicha concordancia de dichas zonas características entre las dos imágenes, calculándose la estimación de dicha calidad de concordancia según los métodos del estado de la técnica (cálculo de correlación, por ejemplo).
 - La etapa de reconstitución de los movimientos de la línea de visión en el horizonte de tiempos [Ti, Tf] consiste en integrar, filtrar y eventualmente remuestrear el conjunto de las variaciones elementales reconstituidas mediante el reajuste del modelo geométrico. Se puede utilizar un filtrado inverso (de tipo Wiener o Kalman), lo que permite potenciar ciertas frecuencias atenuadas a la vez que se limita el impacto del ruido. Para las bajas frecuencias, otro enfoque consiste en ajustar un modelo analítico, por ejemplo, una estimación de los coeficientes de un polinomio que no supere un 5º grado en general, según un método de mínimos cuadrados. Esta etapa de filtrado debe paliar una falta temporal de datos de correlación según una técnica de interpolación adecuada. En este estadio se puede utilizar un conocimiento previo sobre el contenido frecuencial de los movimientos de la línea de visión.

15

- 20 En particular, en el transcurso de la etapa (c), se puede efectuar una integración, un filtrado y eventualmente un remuestreo de las estimaciones de variación de actitud procedentes de la etapa (b) para reconstituir los movimientos de la línea de visión del instrumento, sin la componente absoluta de la orientación del punto de visión, sobre el intervalo de tiempo [Ti, Tf] mediante al menos uno de los siguientes métodos:
- 25 utilizando un filtrado inverso, lo que permite potenciar ciertas frecuencias atenuadas a la vez que se limita el impacto del ruido, por ejemplo, un filtro de Wiener o de Kalman,
 - mediante el ajuste de un modelo analítico, por ejemplo, una estimación de los coeficientes de un polinomio que no supere un 5º grado en general, según un método de mínimos cuadrados.
- 30 En ausencia de concordancia de suficiente calidad de las zonas características seleccionadas en el momento Tn, ventajosamente, se calcula la orientación de la línea de visión en el momento Tn mediante una interpolación de orientaciones de la línea de visión reconstituidas por la aplicación del procedimiento en unos momentos anteriores y posteriores a Tn.
- 35 Se puede utilizar el conocimiento previo del contenido frecuencial de las variaciones en la orientación de la línea de visión para efectuar antes de la etapa (c) un filtrado reteniendo solo las frecuencias implicadas.
- Cuando se dispone de más de dos imágenes, cualquier par de imágenes proporciona informaciones sobre el movimiento que pueden fusionarse entre sí. La fusión puede ser iterativa, en cuyo caso el orden de las iteraciones interviene en el rendimiento final. Las iteraciones pueden encadenarse hasta agotar los datos o convergencia del proceso. Los pares de imágenes de mayor correlación proporcionan una información de movimiento más precisa y robusta que permite, llegado el caso, corregir los movimientos de la línea de visión de una imagen cuyo contenido no esté tan fuertemente correlacionado. En otras palabras, si se utiliza un número de imágenes de una misma escena estrictamente superior a dos, se puede aplicar el procedimiento en varios pares de imágenes y se hibridan los resultados obtenidos a partir de diferentes pares de imágenes de la misma escena implementando un afinado global o iterativo del conocimiento actual de la orientación de la línea de visión durante la captura de fotograma.
- En particular, se puede aplicar el procedimiento a un primer par de imágenes, ventajosamente, de entre los pares de imágenes que supuestamente están mejor correlacionadas, por ejemplo, las capturadas en una misma banda espectral, con el fin de obtener una primera reconstitución de los movimientos de la línea de visión del instrumento en el transcurso de la captura de fotograma, después se trata otro par de imágenes inicializando el modelo de concordancia a partir de valores de la orientación de la línea de visión calculados en la etapa anterior y así sucesivamente hasta agotar los datos u obtener una convergencia.
- Ventajosamente, el instrumento permite formar al menos tres imágenes desfasadas en el tiempo, presentando al menos dos de las imágenes una fuerte correlación entre sí y al menos otra imagen débilmente correlacionada con las otras dos y se corrigen los movimientos de la línea de visión en al menos una imagen débilmente correlacionada con las otras dos gracias a la reconstitución de dichos movimientos de la línea de visión efectuada aplicando el procedimiento en al menos un par de imágenes que presentan una fuerte correlación entre sí.
- La inicialización del modelo de concordancia se puede efectuar con un conocimiento previo de la orientación de la línea de visión en el transcurso de la captura de fotograma. Este conocimiento previo puede proceder de una consigna de orientación o de una medición derivada de sensores de actitud tales como unos sensores estelares, girómetros, etc., o de un conocimiento sobre la posición absoluta en la superficie del globo terrestre de zonas características reconocibles en la imagen o de una hibridación de tales conocimientos. Los efectos de paralaje pueden tenerse en cuenta en el modelo de concordancia, utilizando un conocimiento previo del relieve de las

escenas observadas.

5

20

30

40

45

El procedimiento según la invención y tal y como se ha presentado anteriormente, se aplica, ventajosamente, en el cálculo de la orientación de la línea de visión de un instrumento óptico de captura de fotogramas instalado a bordo de un satélite, estando aplicación caracterizada por que:

- dicho instrumento comprende en su plano focal al menos un detector de tipo tira de típicamente 1 a unas decenas de líneas y comprendiendo cada una de unos 1.000 a unos 10.000 píxeles,
- dicho satélite está colocado en una órbita no estacionaria,
- 10 se apunta el satélite de tal manera que dicho al menos un detector de tipo tira barra la zona que se va a observar durante las capturas de fotogramas, y
 - se aplica el procedimiento tal y como se ha definido anteriormente para estimar la orientación de la línea de visión del instrumento en el transcurso de la captura de un fotograma.
- 15 Como variante, la aplicación es tal que:
 - el instrumento de captura de fotogramas consta siempre, en su plano focal, de al menos un detector de tipo tira,
 - la línea de visión del instrumento está controlada de manera que dicho al menos un detector barra la superficie del globo terrestre, ya sea por rotación del satélite, ya sea gracias al barrido de un espejo orientable colocado en el camino óptico del instrumento, y
 - se aplica el procedimiento de la invención, tal y como se ha definido anteriormente, para estimar la orientación de la línea de visión del instrumento en el transcurso de la captura de un fotograma.

En esta variante, el satélite también puede colocarse en una órbita no estacionaria, pero la órbita del satélite también 25 puede ser geoestacionaria.

También como variante y sea cual sea el caso de aplicación previsto anteriormente, el instrumento de captura de fotogramas puede comprender, en su plano focal, al menos dos detectores de tipo tira, estando las tiras alineadas de manera que sus líneas y columnas sean sustancialmente paralelas respectivamente y estando las dos tiras de cada par de tiras, de las cuales al menos un par está así en el plano focal, estén separadas entre sí a una distancia de típicamente unas fracciones de milímetros en el plano focal, observando así los detectores aproximadamente la misma parte de la escena durante una captura de fotograma, con un desfase temporal directamente dependiente de la distancia entre los detectores en el plano focal.

35 También como variante, cada línea de los detectores del plano focal puede formar una imagen de la escena y se puede tratar un subconjunto de las imágenes así creadas por el conjunto de detectores del plano focal siguiendo el procedimiento de la invención para restituir la orientación de la línea de visión del instrumento.

Según otra variante, el instrumento consta de al menos un detector principal de tipo tira en su plano focal, utilizándose este detector para garantizar la captura de imágenes según unas características deseadas de la misión (ancho de barrido, resolución, calidad de la imagen, etc.), en el plano focal se añade a efectos de aplicar el procedimiento según la invención y como se ha definido anteriormente, al menos un detector dedicado, de menor tamaño, típicamente una matriz de 100x100 píxeles o una tira de 1000x10 píxeles, se coloca dicho detector dedicado a cierta distancia de dicho detector principal y se aplica el procedimiento según la invención.

Ya se dispongan al menos dos detectores principales de tipo tira alineados y separados o ya se dispongan al menos un detector principal de tipo tira y un detector dedicado separados entre sí en el plano focal del instrumento, la separación de los detectores en este plano focal se puede optimizar con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea de visión en una banda de frecuencia dada.

Por último, según otra variante más, dicho instrumento solo comprende un único detector en el plano focal, que barre la escena y el procedimiento según la invención, tal y como se ha definido anteriormente, se aplica en al menos dos imágenes formadas a partir de al menos dos líneas del detector.

55 En ese caso, la elección de las al menos dos líneas del detector utilizadas para formar las al menos dos imágenes puede optimizarse con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea de visión en una banda de frecuencia

La restitución de la orientación de la línea de visión mediante el tratamiento de imágenes puede utilizarse en un proceso de optimización de la calidad de la imagen proporcionada por el instrumento en lo referente a la alteración 60 de las longitudes, la restitución planimétrica, la restitución altimétrica, la superposición de imágenes provenientes de sensores múltiples y/o formadas en diferentes momentos. El procedimiento permite asimismo medir microvibraciones del instrumento en la medida en que su frecuencia no supere las restituibles mediante el procedimiento.

Descripción de las figuras

5

50

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán de la descripción que se aporta a continuación, a modo no limitativo, de ejemplos de realización descritos con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- la figura 1 es un esquema preliminar que muestra la formación de imágenes de partes sucesivas de una banda de terreno observada a partir de un satélite no estacionario provisto de un instrumento de visión hacia el nadir;
 - la figura 2 es un esquema que muestra el efecto de una variación de la línea de visión en balanceo entre dos imágenes sucesivas;
 - la figura 3, similar a la figura 2, muestra el efecto de una variación de la línea de visión en cabeceo;
- 10 la figura 4 es un organigrama del procedimiento;
 - la figura 5 muestra la utilización de la modelización;
 - la figura 6 es un esquema preliminar de la tercera etapa del procedimiento;
 - las figuras 7 y 8 muestran las características de un filtro pseudo-inverso de estimación que puede utilizarse en esta tercera etapa.
- las figuras 9 y 10 muestran el efecto del coeficiente de atenuación de ruido sobre las características de un filtro pseudo-inverso;
 - las figuras 11 y 12, similares a las figuras 9 y 10, muestran el efecto del desfase temporal T;
 - la figura 13 muestra el efecto obtenido en la restitución de la combinación de varios pares de imágenes;
 - la figura 14 muestra el efecto del desfase temporal τ sobre la relación entre la precisión de restitución y el error de medición:
 - la figura 15 es un logigrama del conjunto del procedimiento;
 - la figura 16 es una vista análoga a la figura 1, para la formación de imágenes sucesivas de una banda de terreno observada a partir de un satélite estabilizado en espín equipado con un instrumento óptico de captura de fotogramas;
- 25 la figura 17 es una vista análoga a la figura 1 para un satélite no estabilizado en espín equipado con un espejo orientable en el camino óptico del instrumento óptico y que barre una banda de terreno del suelo, y
 - las figuras 18, 19 y 20 representan tres posibles disposiciones de un conjunto de detección en el plano focal del instrumento de captura de fotogramas de los satélites de las figuras 1, 16 y 17, respectivamente con un único detector de tipo tira de múltiples líneas, tres detectores en tiras de múltiples líneas separadas entre sí y un detector en una tira principal de múltiples líneas, asociado a un detector dedicado más pequeño que el detector principal y separado de este último.

Descripción detallada de la invención

20

30

50

55

- La figura 1, que es un simple esquema donde la escala no se ha respetado, muestra un satélite 10 cuya plataforma soporta un instrumento 12 que tiene en su plano focal un detector matricial bidimensional, controlado de manera que dos imágenes sucesivas, por ejemplo, 14a y 14b, capturadas en momentos separados por un intervalo de tiempo T, presenten un solapamiento notable, que generalmente será al menos igual a la mitad de la imagen. Cada imagen está constituida por una matriz de píxeles, agrupados en líneas (perpendiculares a la dirección de desplazamiento) y columnas (paralelas a la dirección de desplazamiento). En el caso de un aparato con un detector constituido por una tira, que funciona según el principio denominado "barrido y empuje" (push-broom en inglés), la tira está orientada en el sentido de las líneas de la imagen que se ha de obtener.
- La plataforma del satélite 10 y en consecuencia el instrumento, son susceptibles de presentar unos movimientos en torno a los tres ejes x (balanceo), y (cabeceo) y z (guiñada). Todos estos movimientos conllevan variaciones en la orientación de la línea de visión V.
 - Las variaciones de la línea de visión en balanceo, cabeceo y guiñada pueden deberse asimismo a vibraciones que se propagan por el instrumento.
 - En lugar de constar de un único detector que permita capturar vistas sucesivas con solapamiento, el aparato puede constar de dos detectores separados en el campo en dirección del barrido, lo que se traduce en un intervalo de tiempo medio T entre la adquisición de un punto por uno de los detectores y la adquisición del mismo punto por el otro detector.
 - La figura 2 muestra un desfase entre dos imágenes sucesivas provocado por un movimiento de balanceo $\Delta\theta x$ (en torno al eje x). En lugar de presentar la disposición relativa indicada por el cuadro en trazos lisos y el cuadro en trazos mixtos de la figura 2, las imágenes 14 a y 14 b tienen una disposición relativa del tipo que se muestra en 14a y 14b, es decir, un desfase en dirección de las líneas.
 - Como se muestra en la figura 3, una modificación de la orientación en cabeceo conlleva, en primer lugar, un desfase adicional de la imagen en el sentido de las columnas de píxeles, constante sobre toda la anchura del campo, igual a k. Δθy (siendo Δθy la variación de la orientación en torno al eje de cabeceo y siendo k una constante).
- 65 Una variación Δθz en torno al eje de guiñada se traduce en una rotación de la imagen que provoca esencialmente una modificación de posición en el sentido de las columnas de píxeles, variable en la anchura del campo.

Por último, un error de posicionamiento de la línea de visión en guiñada se traduce en primer lugar en un desfase de la imagen en el sentido de las líneas, constante en la anchura del campo, que generalmente no podrá descorrelacionarse del provocado por una variación de balanceo.

Cuando la línea de visión está ligeramente desapuntada con respecto al nadir, los errores de posicionamiento en balanceo y en cabeceo se modifican, pero por una cuantía que con frecuencia se puede ignorar.

Se puede considerar que el procedimiento según la invención consta de tres etapas sucesivas, indicadas en la figura

La primera etapa consiste en un tratamiento de imágenes destinado a concordar las diferentes imágenes disponibles (al menos dos para una misma parte), habiendo adquirido una misma parte de la zona en diferentes momentos, y ello aprovechando su similitud radiométrica, geométrica o textural.

La segunda etapa consiste en deducir, a partir de la identificación de varios pares de puntos homólogos, en un breve periodo de tiempo, la información de variación angular en torno a los tres ejes x, y y z, teniendo en cuenta un modelo geométrico del dispositivo, definido más adelante y afinándolo. En principio dos pares de puntos homólogos en dos imágenes permiten determinar las variaciones. Pero la utilización de más de dos pares permite operar un filtrado sobre el ruido de correlación y también sobre los errores vinculados con el relieve de la escena observada, provocados, sobre todo, por la paralaje.

La tercera etapa consiste en una integración de las medidas para remontar a una estimación de la actitud en cada captura de fotogramas, con respecto a un punto de referencia inicial. Este punto de referencia solo puede ser relativo si solo se utiliza el tratamiento de la imagen. Se puede volver absoluto mediante un reajuste periódico a partir de una restitución absoluta de actitud en un punto de referencia inicial con la ayuda de sensores adicionales, tales como unos giroscopios o sobre todo sensores estelares.

Una vez las imágenes numeradas a la salida de la cadena vídeo, las diferentes etapas del procedimiento pueden realizarse mediante un dispositivo informático constituido, por ejemplo, por una cadena de adquisición y pretratamiento de los datos, por una cadena de tratamiento principal que incluye materiales (microprocesador, FPGA, ASIC) y programas informáticos, permitiendo el conjunto la realización de las etapas de tratamiento según el procedimiento, proporcionando la implementación de estos programas informáticos las variables digitales deseadas, es decir, en particular, los ángulos y las velocidades de rotación de la línea de visión del instrumento considerado.

35 A continuación, se describirá con más detalle las etapas anteriores, utilizando las siguientes notaciones para simplificar:

DSP: densidad espectral de potencia

FTM: función de transferencia de modulación

40 MNE: modelo digital de alzado (o modelo digital de terreno)

PAN: pancromático (imagen) XS: multiespectral (imagen) PIR: infrarrojo cercano (imagen)

5

10

25

30

50

55

60

- 45 El procedimiento de restitución de actitud que se va a describir a continuación, de manera más completa, permite, en concreto, mejorar los rendimientos de restitución en lo referente a:
 - la capacidad de superposición de bandas pancromáticas y XS de trabajo de dos detectores con los que está equipado el instrumento y que proporcionan dos imágenes de la misma escena obtenidas con un desfase temporal.
 - la capacidad de superposición de los píxeles de una banda pancromátrica en unas zonas entre tiras (en el caso de un barrido de empuje y barrido con un detector de tira),
 - la consideración de la alteración de las longitudes como consecuencia de los movimientos,
 - la mejora de la precisión sobre la componente temporal no lineal de la actitud del instrumento.

La concordancia se realizará a menudo en el transcurso de la etapa a) a partir de imágenes obtenidas en diferentes bandas espectrales, en la medida en la que una correlación es susceptible de hacerse. Pero ciertas bandas espectrales se correlacionan mal entre sí, debido al hecho de que tienen diferentes contenidos radiométricos. Es, por ejemplo, el caso entre la banda PIR y las bandas en el visible. En ese caso, la restitución obtenida por comparación de las imágenes en las bandas pancromáticas y XS (o entre dos bandas en el visible) permite aplicar a continuación la restitución de imágenes a la banda PIR; de manera más general, la restitución permite superponer unas imágenes en diferentes bandas espectrales del instrumento que tiene una débil correlación radiométrica.

La determinación de la alteración de las longitudes puede, en concreto, efectuarse a partir de la concordancia entre píxeles PAN y XS.

La determinación de la actitud relativa a partir del tratamiento de imágenes tiene el interés de dar una información lineal, que puede integrarse en el tiempo para adaptar la medida efectuada en la duración (u "horizonte") requerida, generalmente de varios segundos. Este enfoque es mucho más favorable que la utilización de giroscopios, que exigen una larga integración de las mediciones y provocan una acumulación de errores. La concordancia entre los píxeles pancromáticos y XS permite utilizar, en concreto, un intervalo temporal importante y, por tanto, limitar la amplitud de los errores de integración.

Como se ha indicado más arriba, la segunda etapa del procedimiento implementa una modelización geométrica de concordancia de las capturas de fotogramas.

A continuación, se ofrece, en primer lugar, una exposición general de implementación de las diferentes etapas y luego de las indicaciones más detalladas sobre ciertas etapas.

1- ETAPAS SUCESIVAS

15

20

25

10

1. Concordancia de imágenes

La concordancia de imágenes puede efectuarse mediante unas técnicas de filtrado conocidas, mediante una transformada de Fourier, por descomposición en un tren de ondas. El procedimiento utiliza una determinación de cierto número de puntos característicos, identificados como presentando unos entornos de gran variación de radiometría (típicamente segunda derivada con respecto a la distancia superior a un umbral en al menos dos direcciones diferentes) y busca los puntos homólogos de los puntos característicos en al menos otra imagen aprovechando las similitudes. resulta deseable utilizar más de dos pares de puntos, para tener en cuenta los posibles errores de concordancia que pueden tener diferentes orígenes, tales como la calidad radiométrica de las imágenes, la calidad geométrica de las imágenes y el contenido espectral de las imágenes.

En la práctica, las técnicas de registro actualmente disponibles permiten llegar, en el caso de imágenes muy similares, a una resolución que puede llegar hasta un 0,01 píxel para imágenes que corresponden a bandas espectrales idénticas y 0,1 píxel para la concordancia de imágenes en dos bandas espectrales diferentes.

30

2. Estimación de las variaciones angulares

La concordancia de las imágenes permitirá, para la parte común de dos imágenes sucesivas, determinar unos pares de puntos homólogos, como se indica, por ejemplo, esquemáticamente en las imágenes 1 y 2 de la figura 5.

35

Por otra parte, la modelización geométrica del sistema óptico permite asociar con cualquier punto una imagen, tal como el punto A1 de la imagen 1, una posición correspondiente P en la escena observada e, inversamente, el modelo inverso asociado con cualquier punto de la escena, por ejemplo, el punto P, el punto A1 o A2 correspondiente en la imagen 1 o 2.

40

La combinación de los modelos de un par de imágenes permite así tener una estimación de la concordancia entre estas imágenes, pero con incertidumbres que se van a reducir teniendo en cuenta la información de concordancia adquirida mediante el tratamiento de las imágenes en el transcurso de la etapa 1.

- 45 Las incertidumbres tratan en concreto sobre:
 - la posición y la orientación del instrumento,
 - la datación de los datos correspondientes a la imagen 1 y a la imagen 2,
 - la calibración geométrica del instrumento,
- 50 la altitud del punto observado, cada vez que la escena no sea plana,
 - el movimiento de la Tierra.

A continuación, se considera, en sucesión, un modelo de localización en la imagen y un modelo de residuo.

55 Modelo de localización en la imagen

Se designará $Loc\Theta_1$ a la función que asocia, a todos los píxeles de la imagen 1, una estimación de las coordenadas en el suelo del punto correspondiente P.

$$Loc\Theta_1(M(i,j)) = P$$

60

donde i y j corresponden al emplazamiento por líneas y columnas.

P es el punto objetivo en el suelo, que se puede, por ejemplo, identificar con las coordenadas geográficas (λ, ϕ, h)

que son, respectivamente, su longitud, su latitud y su altitud,

 Θ_1 representa el conjunto de parámetros del modelo geométrico asociado a la imagen 1. Estos parámetros pueden constar de la actitud del punto de mira, la posición del satélite, la datación de los parámetros, la modelización geométrica del instrumento (dirección de visión de cada uno de los detectores en el punto mira) y altitud de los puntos observados.

Modelo de residuos

A continuación, se designa $Loc\Theta_1/\Theta_2$ la función que asocia a todos los píxeles de la imagen 1, una estimación de su homólogo en la imagen 2. Esta función resulta de la combinación del modelo directo de la imagen 1 y del modelo inverso de la imagen 2:

$$Loc\Theta_1/\Theta_2 = Loc\Theta_1 \circ (Loc\Theta_2)^{-1}$$

15 Se denominará a esta función el modelo geométrico de concordancia o simplemente modelo de concordancia.

Se designará H a la función de correlación sobre la imagen que, en un punto M1 de la imagen 1, asocia por correlación su homólogo M2 en la imagen 2.

$$H(M_1(i_1, j_1)) = M_2(i_2, j_2)$$

Idealmente, se tendría H = $Loc\Theta_1/\Theta_2$

En la práctica, H está afectada por el error de concordancia de las imágenes y $Loc\Theta_1/\Theta_2$ está afectada por la incertidumbre sobre el conocimiento de los parámetros del modelo y, en particular, de los parámetros de actitud del punto de referencia de mira.

Se designará Res Θ_1/Θ_2 a la función residuo que, para todos los puntos de la imagen 1, asocia la desviación entre el punto M2 de la imagen 2 obtenido mediante la función H y el punto M'2 obtenido por Loc Θ_1/Θ_2 . Entonces se tienen las siguientes fórmulas (1):

$$Res\Theta_1/\Theta_2 (M1(i_1, j_1)) = M_2.M'_2 = (di, dj) = (i'_2 - i_2, j'_2 - j_2)$$

con $M_2(i_2,j_2) = Loc\Theta_1/\Theta_2 (M1(i_1,j_1))$

35 $M'_2(i'_2,j'_2) = H(M_1(i_1,j_1))$, punto homólogo, obtenido por correlación de imágenes, por ejemplo.

A partir de varios pares de puntos homólogos en las dos imágenes, obtenidos por correlación y considerando un modelo geométrico inicial para cada una de las dos imágenes, se accede entonces a una medición de residuo.

40 Efecto de los errores

En este estadio, conviene analizar las fuentes de error.

Las fuentes de error pueden dividirse en:

45

50

60

20

30

- 1) Errores de concordancia, realizados durante la asociación de las imágenes punto a punto, según unos criterios radiométricos, procedentes del ruido de la imagen, de una débil estructuración eventual de la imagen, de una diferencia de contenido en las imágenes, del método de cálculo de la concordancia, etc....
- 2) Errores del sistema que intervienen en la correspondencia entre las desviaciones angulares de la línea de visión y los residuos medidos en coordenadas píxel, debidos al desconocimiento de la modelización geométrica del sistema.
- 3) Errores del método que permite el cálculo de las desviaciones angulares (filtrado de Wiener o Kalman, mínimos cuadrados u otro)
- 55 El residuo medido, designado por la función ResΘ₁/Θ₂, integra los errores que se han enumerado anteriormente, más los errores de variación de actitud que se desean medir.

Las medidas a seguir consisten en traducir el efecto de cada uno de los errores sobre la medición de residuo, en píxeles equivalentes y deducir el error de estimación angular, despreciando las causas de aquellos errores que se haya constatado que son más pequeños.

Se considera cada una de las componentes di y dj de la función residuo como una función escalar. El análisis de estas funciones puede hacerse por linealización alrededor del punto de origen:

$$di(M_1) = Ei(M_1) + \sum_{\theta} \frac{\partial di}{\partial \theta}(M_1).d\theta$$

$$dj(M_1) = Ej(M_1) + \sum_{\alpha} \frac{\partial dj}{\partial \theta}(M_1).d\theta$$

5 donde

10

15

Ei y Ej son los errores de concordancia realizados por H,

dθ designa la incertidumbre sobre el conocimiento del parámetro θ cualesquiera en Θ_1 y Θ_2 , $\frac{\partial di}{\partial \theta}$ y $\frac{\partial dj}{\partial \theta}$ son las sensibilidades del residuo a la incertidumbre dθ en el punto M_1 .

Se verifica que una variación en el balanceo crea un desfase en la dirección de las líneas, pero prácticamente nada en la de las columnas, que una variación en el cabeceo prácticamente solo crea un desfase en la dirección de las líneas, que una variación de la guiñada prácticamente solo es apreciable en el borde del campo y en dirección de las columnas y puede despreciarse, que los coeficientes de sensibilidad a las variaciones angulares dependen muy poco del ángulo de visión que se traduce sobre todo en un desfase casi constante en una columna.

Se ha verificado asimismo que las otras causas tienen un efecto proporcional al intervalo temporal de adquisición (es decir, a la distancia entre tiras de detección) y que muchos de sus efectos son despreciables, en la medida en el que el desapuntado es pequeño.

20 Para reducir los volúmenes de cálculo, el procedimiento utilizará en general una modelización lineal de primer orden y una aproximación del modelo de primer orden.

Modelización lineal de residuo de 1er orden

25 La linealización del residuo consiste en hacer una aproximación según la siguiente fórmula lineal:

$$di = \sum_{\alpha} C_i(j) . d\theta + Ei_{med} + Ei_{lin}$$

$$dj = \sum_{\theta} C_{j}(j).d\theta + Ej_{med} + Ej_{lin}$$

donde

30

35

40

45

50

E_{med} son los errores de concordancia de imagen

Elin son los errores de modelización lineal

Los coeficientes C dependen del desapuntado, así como de la posición del punto característico en el campo

Aproximación del modelo de 1er orden

En la medida en la que no se busca resolver las ambigüedades, la modelización lineal se reduce, al 1er orden, en:

$$di = C_{\Delta T}(j).d\Delta T + C_{\Delta T}(j).d\Delta L + C_{h}(j).dh + Ei_{med} + Ei_{lin} + Ei_{terorden}$$

$$dj = C_{\Delta R}(j).d\Delta R + Ej_{med} + Ej_{lin} + Ej_{terorden}$$
(2)

donde E₁er_{orden} son los errores vinculados a esta nueva aproximación.

3-Restitución de actitud por análisis armónico

Una vez que se ha efectuado:

- el cálculo de los puntos homólogos por tratamiento de imagen,
- las estimaciones angulares correspondientes,

se dispone de estimaciones de las variaciones angulares, en un intervalo temporal dado, de la actitud del satélite en torno a los tres ejes, muestreados regularmente durante este intervalo.

Falta restituir la actitud del satélite.

5

10

20

25

30

En este caso se trata cada eje independientemente. Se designará:

 $\theta(t)$ a la actitud correspondiente a uno de los tres ejes y

$$\Delta\theta(t) = \theta(t+\tau) - \theta(t)$$

a la variación angular mensurable.

Se va a definir un estimador de $\theta(t)$ a partir de las medidas de $\Delta\theta(t)$ y sus características en términos de función de transferencia. Luego, se indicarán los resultados.

Se puede esquematizar el sistema como se indica en la figura 6, donde θ es el valor de θ estimado mediante el 15 proceso, $H(\omega)$ designa el estimador y B corresponde al error de medición (error de correlación, paralaje, residuos de modelo aeométrico).

Se trata en este caso de un problema de deconvolución, que consiste en estimar unos parámetros a partir de mediciones procedentes de un sistema lineal espacialmente invariable, modelizable mediante una ecuación de convolución, es decir, un análisis armónico. El estimador puede formularse, en concreto, como un filtrado pseudoinverso en el espacio de Fourier:

$$\theta(t) \rightarrow F(\theta(t)) = \Theta(\omega)$$

$$\theta(t+\tau) \rightarrow F(\theta(t+\tau)) = e^{j\omega\tau}.\Theta(\omega)$$

Se tiene, por tanto: $G(\omega) = e^{j\omega\tau} - 1$

$$H_{\text{inverso}}(\omega) = \frac{1}{e^{j\omega \tau} - 1}$$

 $H_{inverso}(\omega)=rac{1}{e^{j\omega au}-1}$ Los problemas que se han de resolver para el El filtro inverso asociado teórico es: tratamiento por medio de esta vía se deben a que:

- La función G se anula para las frecuencias $\omega = 2.\pi.n/\tau$, donde n es un entero cualquiera. A estas frecuencias, el filtro inverso no está definido
- Alrededor de estas frecuencias, la ganancia del filtro adopta valores muy altos que aumentan considerablemente

Para paliar los límites del simple filtro inverso se pueden utilizar otras técnicas de filtrado, mejores para limitar el impacto del ruido, tal como el filtrado de Wiener o el filtrado de Kalman. En el presente documento detallamos la 35 utilización de un filtrado de Wiener.

La teoría de Wiener desemboca en la definición de un filtro óptimo en el sentido de la minimización del error cuadrático medio. En el caso en el que la señal mensurable Δθ sea el resultado de un proceso aleatorio estacionario y ergódico y donde la señal y el ruido de medición estén correlacionados, la ecuación del filtro en el dominio de la 40 frecuencia es:

$$H_{\text{Wiener}} = \frac{\overline{G}}{\left|G\right|^2 + \frac{P_B}{P_\theta}}$$

45 donde P₀ y P_B son respectivamente, las densidades espectrales de potencia de la señal que se va a restaurar y del ruido. Estas dos funciones no se conocen previamente. Pueden o bien estimarse (algoritmo recursivo), bien modelizarse o bien considerarse constantes.

Con frecuencia se podrá adoptar la tercera hipótesis lo que conlleva el siguiente filtro pseudo-inverso:

$$H_{k} = \frac{\overline{G}}{\left|G\right|^{2} + k}$$

Se obtiene entonces:

$$H_k(\omega) = \frac{e^{-j\omega\tau} - 1}{2.(1 - \cos\omega\tau) + k}$$

5 Y la ganancia de la cadena es:

(3)

Se ve que el estimador no introduce desfases.

- 10 Las figuras 7 y 8 muestran las características del filtro de estimación de Wiener que se obtiene utilizando los siguientes parámetros:
 - mediciones a una frecuencia de muestreo fm > 100 Hz
 - duración de variación (intervalo de tiempo entre dos bandas consecutivas): 7,44 ms (134,4 Hz)
- 15 coeficiente k de atenuación de ruido: 0,1

20

30

45

55

Se constata que el filtro de Wiener corta en todos los armónicos de frecuencia n.f_T. debido al hecho de que, a estas frecuencias, no hay señal. El filtro inverso tiende a divergir, a pesar de la elección hecha para k, cuyo efecto se muestra en las figuras 9 y 10 con los mismos parámetros restantes que en las figuras 7 y 8.

Un valor de k importante corresponde a un nivel de ruido de medición de la variación angular importante con respecto al nivel de la señal (error inicial sobre el conocimiento de esta variación). El filtrado de los datos es más fuerte y las bandas de corte son más grandes.

25 El aumento de k disminuye además la ganancia de la cadena completa de tratamiento.

Se ha determinado asimismo la influencia del intervalo de tiempo τ entre las adquisiciones con los mismos parámetros que en las figuras 9 y 10, haciendo variar el valor de τ. Las figuras 11 y 12 muestran los cortes a las frecuencias n/ τ. Más se quiere aumentar la frecuencia, más hay que adoptar un valor pequeño de τ. Pero la anchura de las bandas de corte aumenta también, sobre todo para las bajas frecuencias, que imponen un valor de τ bajo. Se encuentra un mismo efecto sobre la ganancia y por lo general será necesario llegar a un compromiso.

El análisis que se acaba de hacer muestra que la banda de frecuencia restituible depende sustancialmente de dos parámetros temporales:

35 - el periodo Te de las mediciones,

- la duración T entre las dos adquisiciones de un mismo punto (habitualmente entre dos bandas espectrales).

A continuación, se indica, a partir de un ejemplo, como estimar la banda de frecuencia restituible en función de los diferentes parámetros del instrumento.

PAN / B1: T ~ 150 ms. Según el teorema de Shannon, no es posible restituir frecuencias superiores a fm/2 = 1/2.Te. En la práctica, normalmente se toma un margen de un factor 2. Con la hipótesis de que se dispone de una medición, todas las líneas (de periodo Te), se deduce que la frecuencia máxima restituible es teóricamente de 1/(4.Te) Hercios. Pero las mediciones por correlación de imágenes son filtradas intrínsecamente debido al tamaño de la viñeta de correlación.

Por ejemplo, si la altura de la viñeta es de 10 líneas, la constante temporal es entonces de 10xTe, es decir un corte a 1/(10.Te) Hz.

Por otra parte, en la banda de frecuencias así definida por el periodo de muestreo de las mediciones, la diferenciación en un intervalo temporal τ introduce unas bandas más estrechas entre las cuales la señal está cortada. Es necesario un compromiso o una combinación. En efecto, un fuerte valor de τ permite bajar aún más en frecuencia, pero con unas bandas estrechas. Al contrario, un valor pequeño de τ produce unas bandas grandes, pero no permite restituir las bajas frecuencias.

En el ejemplo de 4 bandas designadas PAN, B0, B1, B2, se puede considerar el conjunto de los siguientes pares:

PAN / B2: $T \sim 172,2 \text{ ms}$ B1 / B2: $T \sim 22,2 \text{ ms}$ B1 / B0: $T \sim 7,4 \text{ ms}$ B2 / B0: $T \sim 14,8 \text{ ms}$ La banda restituible puede entonces definirse mediante el valor máximo de las bandas elementales. La figura 13 muestra como la combinación de los pares de imágenes disponibles permite restituir la señal en una banda amplia.

II - DETALLE DE LAS ETAPAS

5

A continuación, se ofrecen indicaciones adicionales sobre la implementación, en el caso de imágenes obtenidas con un detector que funciona en modo de "empuje y barrido" (push broom en inglés) y con un detector matricial 2D.

1. Concordancia de imágenes

10

La concordancia entre imágenes implica, para cierto número de "puntos característicos" de una imagen, buscar sus puntos homólogos en las otras imágenes, aprovechando las similitudes en las inmediaciones de los puntos en las diferentes imágenes.

Los errores de concordancia tienen distintos orígenes:

15

- · la calidad radiométrica de las imágenes,
- la calidad geométrica de las imágenes (cartografía local del plano focal, movimientos de la línea de visión, relieve terrestre y efectos de paralaje),
- la información radiométrica: el contenido espectral, la estructura del entorno del punto característico

20

35

60

65

El movimiento de la línea de visión tiene un impacto distinto sobre el rendimiento de concordancia que sigue al modo de adquisición de imágenes.

En el caso del empuje y barrido, la dirección de las columnas es también una dimensión temporal. Ahora bien, la concordancia se efectúa en una zona bidimensional (viñeta) en las inmediaciones de un punto. Contiene los movimientos de la línea de visión durante la duración de su adquisición. La correlación funciona como un filtrado en la señal que se pretende medir. Este problema no existe en el caso de detectores matriciales.

En lo que respecta a la concordancia, los algoritmos que se pueden contemplar comprenden la correlación de imágenes, el filtrado, los planteamientos por transformada de Fourier o por descomposición en trenes de ondas.

En la práctica, es preferible disponer de al menos una decena de puntos homólogos para cada línea de imagen, suficientemente alejadas en la columna para que los errores de concordancia sean independientes.

El cálculo de la variación angular puede hacerse para cada una de las líneas de imagen, por lo tanto, en el mismo paso de muestreo temporal que las líneas de imagen. Cada muestra está afectada, por tanto, por un ruido procedente del error de concordancia de las imágenes que no está correlacionado.

2. Estimación de las variaciones angulares

La concordancia entre les imágenes permite obtener cierto número de pares de puntos homólogos, definidos sobre un criterio esencialmente radiométrico. La modelización geométrica del sistema permite obtener una predicción de estos puntos homólogos. Se puede utilizar para ello algoritmos de tipo localización / localización inversa. El residuo (diferencias entre el punto predicho y el punto correlacionado) corresponde a los errores de conocimiento de estos parámetros, así como a las aproximaciones hechas por el modelo. La estimación de las variaciones de actitud exige separar estas contribuciones de los otros puestos (modelo, instrumento, paralaje, etc...).

El tratamiento puede realizarse en cada punto homólogo o globalmente por toda la anchura del campo.

La segunda solución tiene la ventaja, por una parte, de operar cierto filtrado sobre las mediciones y, por otra parte, de sacar provecho de las invariantes de la imagen relativas a la rigidez del plano focal y al hecho de que el movimiento del punto de mira sea el mismo sea cual sea el punto del campo que se esté considerando. Un cálculo de tipo estimación por mínimos cuadrados podrá utilizarse como estimación instantánea de la variación de actitud.

La concordancia proporciona las coordenadas en píxeles "absolutas" de los puntos en una imagen, así como las coordenadas de puntos homólogos en la otra imagen. Esta concordancia es difícil de aprovechar si no se dispone de referencias.

Se puede calcular una referencia mediante la predicción del punto utilizando el mejor conocimiento geométrico del sistema. El residuo es entonces la desviación entre los dos puntos. Incluye el conjunto de errores vinculados a este conocimiento, salvo los efectos geométricos conocidos.

Se puede contemplar la restitución de:

- la orientación del punto de mira, o
- la dirección de visión o en uno o varios puntos del campo.

El residuo se estima mediante las fórmulas (1) ya mencionadas:

$$Res\Theta_1/\Theta_2 (M1(i_1, j_1)) = M_2.M'_2 = (di, dj) = (i_2 - i_2, j_2 - j_2)$$

5 con $M_2(i_2,j_2) = Loc^{-1}\Theta_2$ o $Loc\Theta_1$ (M1(i₁,j₁))

10

30

35

40

45

50

55

 $M'_2(i'_2,j'_2) = H(M1(i_1,j_1))$ punto homólogo proporcionado por correlación de imagen

Los efectos vinculados con la falta de conocimiento de la orientación absoluta son pequeños (pero con frecuencia no despreciables) con respecto a los efectos vinculados con el movimiento. Esta orientación absoluta no es directamente observable, ya que sus efectos se confunden con los vinculados con el movimiento. Por otra parte, en ciertos ejes, la sensibilidad es muy pequeña. De ello resulta que se puede modelizar el residuo a un primer orden mediante las ecuaciones:

$$di = C_{\Lambda T}(j).d\Delta T + C_{\Lambda L}(j).d\Delta L + C_{h}(j).dh + Ei$$

$$dj = C_{\Delta R}(j).d\Delta R + Ej$$

15 que constituyen una simplificación de las ecuaciones (2) ya mencionadas

Una sincronización temporal es necesaria.

En el caso de adquisición por empuje y barrido, los puntos adquiridos en el mismo instante se encuentran en la misma línea. En contrapartida, no es forzosamente el caso de sus homólogos, como consecuencia del no paralelismo de los planos de adquisición, de los movimientos de rotación en torno al eje de visión, de los efectos de proyección geométrica. De ello resulta que el intervalo entre dos adquisiciones no es rigurosamente constante a lo largo de la línea.

25 El problema puede evitarse en el caso de utilizarse matrices de detección.

Si se dispone de un conjunto de pares homólogos tales que todos los puntos de la imagen 1 se adquieren en el mismo momento t, es decir, distribuidos a lo largo de la línea i, sus puntos homólogos no están forzosamente en la misma línea de la imagen 2 y no se adquieren en el mismo momento.

Sea t+τ', el momento de adquisición de uno de los puntos en la imagen 2. Se supondrá que τ' está próximo a un intervalo de referencia τ.

Entonces se tiene:

$$dj(t, t+\tau') = dj(t, t+\tau) + dj(t+\tau, t+\tau') = C_{\Delta T}(j).d\Delta R(t, t+\tau) + C_{\Delta T}(j).d\Delta R(t+\tau, t+\tau') + Ej$$

Por linearización, se considera que $d\Delta R(t+\tau, t+\tau') \sim (\tau'-\tau).d(dR/dt)(t+\tau)$ Esta aproximación está justificada cuando el intervalo entre τ y τ' es corto y la velocidad de rotación es prácticamente constante e igual a la del momento $t+\tau$.

$$dj(t, t+\tau') = C_{\Delta T}(j).d\Delta R(t, t+\tau) + C_{\Delta T}(j).(\tau' - \tau).d(dR/dt)(t+\tau) + Ej$$

Se presentan dos casos:

en un primer caso, los valores τ' para todos los puntos homólogos están muy próximos; entonces d(dR/dt)(t+τ) no es observable, por el contrario, resulta fácil calcular dΔR(t, t+τ') como la media de dj(t, t+τ')/ C_{ΔT}(j). Cuando τ' ≠ τ, si el filtro de estimación funciona con un valor de intervalo temporal constante igual a τ, es necesario efectuar una compensación. Como no se conoce d(dR/dt)(t+τ) dado que se trata del error sobre el conocimiento del movimiento, expresado en velocidad, se hace una aproximación mediante dΔR(t, t+τ)/ τ. Se obtiene entonces un modelo sincronizado para el residuo definido por:

$$dj(t, t+\tau') = C_{\Delta T}(j).(\tau'/\tau).d\Delta R(t, t+\tau) + Ej + Ej_{sinc}$$

donde Eisinc es el error cometido durante la operación de sincronización.

- en un segundo caso, el sistema puede invertirse y se puede realizar la estimación mediante un método clásico de mínimos cuadrados.

En línea, el mismo razonamiento lleva a la resolución de la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{di}(t,t+\tau') &= \alpha(j).\text{d}\Delta T(t,t+\tau) + \alpha(j). \ (\tau'-\tau).\text{d}(\text{d}T/\text{d}t)(t+\tau) + \\ \beta(j).\text{d}\Delta L(t,t+\tau) + \beta(j). \ (\tau'-\tau).\text{d}(\text{d}L/\text{d}t)(t+\tau) + \gamma(j).\text{d}h + \text{Ej} \end{aligned}$$

en el caso de un sistema que puede invertirse.

5 En caso contrario, la ecuación se reduce a:

$$di(t, t+\tau') = \alpha(j). \ (\tau'/\tau).d\Delta T(t, t+\tau) + \beta(j). \ (\tau'/\tau).d\Delta L(t, t+\tau) + \gamma(j).dh + Ej + Ej_{sinc}$$

Los coeficientes de sensibilidad pueden calcularse numéricamente para cada punto del plano focal y para cada nomento, utilizando el mejor conocimiento del sistema del que se dispone. Se calculan dos puntos homólogos en la imagen 2 correspondientes a un mismo punto en la imagen 1, haciendo variar muy ligeramente uno de los parámetros.

$$\frac{\partial di}{\partial \theta}(M_1) \approx \frac{i'_2 - i_2}{d\theta}$$

$$\frac{\partial dj}{\partial \theta}(M_1) \approx \frac{j'_2 - j_2}{d\theta}$$

15

La paralaje tiene un efecto perceptible esencialmente en dirección de las columnas. El sistema de ecuaciones definido para cada punto homólogo puede escribir en forma de:

$$di = \alpha(j).d\Delta T + \beta(j).d\Delta L + \gamma(j).dh(j) + Ej$$

20

25

30

donde h es la altura.

Solo puede resolverse si, en cada nuevo punto homólogo, el desconocimiento de su altitud es una nueva incógnita. En la medida en que $\alpha(j)$ es prácticamente constante y en que $\beta(j)$ es prácticamente lineal, se pueden resolver entonces las siguientes ecuaciones simplificadas:

$$di = \alpha(j).d\Delta T + \beta(j).d\Delta L + Ej,$$

lo que equivale a estimar la altitud en cada punto, a lo largo de la línea, habida cuenta de la componente lineal que se corresponde a un desconocimiento de la pendiente media a lo largo de la línea:

$$dh_{est} = dh_{real} + A_h + j.B_h$$

Al hacer esta aproximación, se supone que esta pendiente media es nula, lo que puede considerarse razonable si se dispone de un mínimo de información sobre el relieve.

Hay 2 parámetros a estimar en columna y 4 en línea. Ahora bien, un par de puntos homólogos solo proporcionan información en dos dimensiones. De ello resulta que hace falta al menos 4 pares para realizar una estimación. En la práctica, se utilizan más, lo que permite filtrar los errores de correlación, teniendo, no obstante, en cuenta el tiempo de cálculo y en la medida en la que se dispone de un número suficiente de puntos característicos. Además, resulta deseable que haya puntos espaciados en el campo para permitir una buena estimación en guiñada.

III - INTEGRACIÓN Y FILTRADO TEMPORAL

Dos enfoques son posibles para la integración y el filtrado de temporal de las mediciones que permiten obtener una restitución de actitud fina.

El primero consiste en afinar el perfil de actitud restituido de manera clásica, del que se da un modelo de error, mediante una estimación de los parámetros de este modelo de error.

50

40

El segundo enfoque consiste en retomar el conjunto de las mediciones de actitud válidas, procedentes de los diferentes sensores, cuando están disponibles y de volver a hacer una estimación completa en el suelo, asociando esta vez las mediciones de imagen. Sea cual sea el enfoque, se trata de un problema de tratamiento de la señal

para el que se dispone de algoritmos tales como el filtrado de Wiener o estadístico, el método de mínimos cuadrados, etc., ...).

A continuación, se describen unos ejemplos.

5 Filtrado de Wiener:

10

15

20

40

50

La teoría de Wiener que se aplica en el presente documento lleva al filtro de estimación cuya ganancia viene dada por la fórmula (3) ya mencionada.

$$F_k(\omega) = G(\omega).H_k(\omega) = \frac{2.(1 - \cos \omega \tau)}{2.(1 - \cos \omega \tau) + k}$$
(3)

Tal filtro lleva a un error sobre la estimación $E(\omega)$ debido esencialmente a dos contribuidores: el ruido de medición y el sesgo de la estimación introducida por el coeficiente k.

Los resultados del análisis del efecto del ruido muestran que la ganancia sobre el rendimiento de restitución en presencia de un ruido de medición "blanco" no depende del intervalo τ.

El análisis del efecto de k muestra que el rendimiento del filtro pasa por un óptimo para un valor de k dado. Si k es demasiado pequeño, el ruido de medición se amplifica con demasiada fuerza. Si k es demasiado grande, la señal que se quiere restituir se filtra demasiado. Teóricamente el valor de k óptimo vale 1/RSB², en el caso de dos ruidos blancos. En la práctica, las señales (señal útil y señal de error) son mucho más complejas que un simple ruido blanco. Si se adopta el enfoque de Wiener para la restitución, el coeficiente podría optimizarse a partir de simulaciones.

Si la señal que se quiere restituir es un ruido "de color" (blanco cortado a una frecuencia fc o ω_c), la densidad espectral de potencia DSP viene dada por:

$$DSP_{\Theta}(\omega) = \sigma_{\Theta}^2 \cdot (\omega_e/2\omega_c)^2 \cdot \delta(\omega < \omega_c)$$

$$DSP_{Eest}(\omega) = |F_k(\omega) - 1|^2 \cdot DSP_{\Theta}(\omega)$$

$$\sigma_{\text{Eest}} = \left[\phi_{\text{Eest}}(0) \right]^{1/2} = \sigma_{\Theta}.(\omega_e/2\omega_c) . \left[\ \mathfrak{I}^{-1}[|F_k(\omega) - 1|^2. \ \delta(\omega < \omega_c)](0) \ \right]^{1/2}$$

donde ω_e es la frecuencia de muestreo y $\delta(\omega < \omega_c)$ vale 1 para $\omega < \omega_c$, y es nulo en otros sitios. El coeficiente k óptimo tiene la siguiente forma:

$$k = a/RSB^2$$

Las bajas frecuencias presentan los problemas de los giroscopios que son las derivas a largo plazo: cualquier error de medición a baja frecuencia (sesgo o variación lenta), incluso bajo, puede adoptar grandes proporciones debido a la integración.

Para restaurar las bajas frecuencias, se pueden utilizar mediciones de actitud durante una duración τ larga y disminuir el coeficiente k del filtro. Esto solo puede hacerse si se disminuyen los ruidos de medición, filtrando más allá de una frecuencia inferior al primer corte del filtro de Wiener (1/τ).

Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados, para estimar los parámetros de una modelización polinomial de la señal, permite tratar mejor las bajas frecuencias.

En primer lugar, conviene formular un estimador de bajas frecuencias mediante los mínimos cuadrados

Si se modeliza $\theta(t)$ por medio de un modelo polinomial, por ejemplo:

$$\theta(t) = \theta_0 + \theta_1 \cdot t + \dots + \theta_n t^n + \varepsilon(t)$$

la señal que se quiere medir vale:

$$\Delta\theta(t) = \theta_1.\tau + \theta_2.[(t+\tau)^2 - t^2] + \dots + \theta_n.[(t+\tau)^n - t^n] + \Delta\varepsilon(t)$$

La componente continua no es restituible.

Con la formulación: $\Theta = (\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n)$, y $\tau(t) = (\tau, [(t+\tau)^2 - t^2], ..., [(t+\tau)^n - t^n])$ Si se dispone de k1 mediciones: $\Delta\theta_i = \Delta\theta_{med}(t_i)$ para i entre 1 y k1.

Se tiene: $\Delta\theta_i = \tau(t_i)^T$. $\Theta + \Delta\epsilon(t_i) + \epsilon_{med i}$

A continuación, se designa:

$$\Delta\Theta = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, ..., \Delta\theta_k),$$

$$M_{\tau}$$
 = matriz de k líneas $\tau(t_i)$

$$B = (\Delta \varepsilon(t_1) + \varepsilon_{med \ 1} ..., \Delta \varepsilon(t_k) + \varepsilon_{med \ k})$$

10 La ecuación de medición se escribe entonces: $\Delta\Theta = M_T$. $\Theta + B$

La solución óptima, en el sentido de los mínimos cuadrados ponderados, viene entonces dada por:

$$\Theta_{\text{est}} = (M_{\tau}^{T}.\Gamma_{\text{med}}^{-1}.M_{\tau})^{-1}.M_{\tau}^{T}.\Gamma_{\text{med}}^{-1}.\Delta\Theta$$

donde Γ_{med} es la matriz de covarianza E(B.B^T)

Solo se puede caracterizar el error sobre la estimación de $\theta(t)$ - θ_0 :

$$\sigma_{\text{est}}^2(t) = \mathbb{E}[(\theta_{\text{est}}(t) - \theta(t)).(\theta_{\text{est}}(t) - \theta(t))^T] = T(t). \Gamma_{\text{est}}.T(t)^T$$

con $T(t) = (t, t^2, ..., t^n)$

15

20

30

35

40

45

En este caso se caracteriza un error relativo, sabiendo que en el momento de origen t=0, por tanto, $\sigma_{est}(t) = 0$, lo que significa que el error en este momento se traslada enteramente sobre la indeterminación de θ_0 . De ello resulta que la noción de error de estimación solo se aplica sobre un intervalo temporal limitado. Se podrá entonces considerar, como criterio dimensionador, los valores estadísticos de $\sigma_{est}(t)$ sobre la duración de restitución (Máximo y media).

Hipótesis para una estimación del rendimiento:

- Las k mediciones son independientes y tienen una desviación típica σ_{med}.
- Las mediciones se muestrean regularmente en un paso Te en los momentos: t_i = i. Te t₀

Entonces se tiene: $\Gamma_{\text{med}} = \sigma^2_{\text{med.}} I_d \text{ y } \Gamma_{\text{est}} = \sigma^2_{\text{med.}} (M_T^T.M_T)^{-1}$

El rendimiento viene entonces dado por los valores estadísticos (media y valor máximo) sobre la duración de la captura de fotograma (o del segmento) de la ganancia:

$$\sigma_{\text{est}}(t)/\sigma_{\text{med}} = [T(t).(M_{\tau}^{T}.M_{\tau})^{-1}.T(t)^{T}]^{1/2}$$

Una ganancia de aproximadamente 1 permite obtener un rendimiento de restitución de actitud similar al rendimiento de medición de variaciones angulares iniciales. Se busca mantener esta ganancia sistemáticamente inferior a 10, si se hace la analogía entre el error de correlación de las imágenes (típicamente, 0,1 píxel) y el error de restitución de actitud admisible (típicamente 1 píxel).

El error prácticamente solo es sensible a los parámetros temporales, desviación τ, sin muestreo Te y horizonte de restitución n.Te (siendo n el número de mediciones).

La variación de la ganancia (relación entre la precisión de restitución y el error de medición en función de τ se indica en la figura 14 para:

- periodo de muestreo de línea de 0,5 ms
- 1 medición independiente cada 10 líneas,
- Duración de una captura de fotograma: 12000 líneas, es decir, 6 s, lo que pone a disposición (1200 mediciones)

Estimación con un polinomio de cinco coeficientes

Los valores de ganancia mostrados en la figura 14 son valores medios y máximos de σ_{est} (t)/ σ_{med} durante el tiempo de duración de la observación de 6 s.

Se constata un decrecimiento casi-lineal de ganancia en función de T. Por debajo de 10 ms aproximadamente, el rendimiento se vuelve mediocre. La remontada de la ganancia para grandes valores de τ se corresponde al hecho de que las bajas frecuencias ya no están completamente representadas en las mediciones, por tanto, las estimaciones de los coeficientes polinomiales de un orden superior a 1 se vuelven malas.

10

Por otra parte, T no puede superar ni siguiera acercarse a la duración de observación, dado que ya no hay una posible concordancia de las imágenes.

En conclusión, las baias frecuencias (distintas a la componente continua) pueden restituirse correctamente según un 15 modelo polinomial con:

- un número suficiente de mediciones.
- una desviación temporal entre imágenes bastante grande, típicamente de entre 0,1 y 1 s
- un orden del modelo polinomial relativamente pequeño, en general que no pase de 5.

20

El conjunto del tratamiento de restitución de la orientación de la línea de visión está representado en la figura 15, cuando se utiliza un proceso iterativo de afinado de la estimación que permite tener en cuenta diferentes pares de imágenes, pudiendo estar cada par asociado a un intervalo temporal τ específico.

25

La etapa 20 de selección de los puntos a correlacionar constituye el principio de iteración. Puede constar de un mecanismo de rechazo de puntos homólogos falsos (procedentes de la iteración anterior), para aumentar la robustez del tratamiento frente a los errores de concordancia. El proceso se inicia mediante una estimación inicial, constituida por el mejor conocimiento de la orientación de visión del que se disponga. Este conocimiento puede proceder de mediciones giroscópicas, de mediciones proporcionadas por un sensor estelar, de la consigna de captura de

30 fotograma o de cualquier hibridación de estas informaciones.

La predicción de los puntos homólogos de una imagen con respecto otra se realiza en la etapa 22 mediante un algoritmo de localización / localización inversa que puede ser el descrito anteriormente balo la rúbrica "modelo de localización en la imagen". Esta predicción tiene en cuenta unas indicaciones memorizadas, tales como el modelo de instrumento, las características de órbita, un modelo numérico de elevación del terreno observado.

35

40

La concordancia de las imágenes punto a punto, en la etapa 24, se realiza mediante cualquier tipo de algoritmo de concordancia que aproveche el parecido radiométrico entre imágenes. La inicialización de esta concordancia, limitando la zona de búsqueda de puntos homólogos, puede venir dada por el conocimiento de los puntos predichos en 22. El tamaño de la zona de búsqueda viene entonces determinado por la precisión del predictor.

Los residuos se proporcionan por sustracción en 26. La estimación de las variaciones angulares a partir de los residuos se realiza en la etapa 28 según el algoritmo dado en II-2 "estimación de las variaciones angulares".

45

Por último, la etapa 30 de integración y filtrado de las mediciones angulares se realiza según los algoritmos presentados bajo el título II-3 "integración y filtrado temporal". El tratamiento puede venir precedido de un filtrado paso bajo cuando la frecuencia de muestreo de las mediciones es ampliamente superior a las frecuencias en el movimiento de la línea de visión, lo que con frecuencia es el caso. Tal filtrado permite alisar las mediciones y eliminar los ruidos a alta frecuencia que son ruidos de medición. La estimación afinada (y eventualmente la orientación absoluta) de la línea de visión puede restituirse a partir de la estimación inicial por un sustractor 32, cuya salida puede volver a ponerse en bucle en la entrada del tratamiento.

50

55

El procedimiento descrito anteriormente encuentra una aplicación particularmente ventajosa en el cálculo de la orientación de la línea de visión V de un instrumento óptico 12 de captura de fotogramas instalado a bordo de un satélite 10, como ya se ha descrito antes, con referencia a la figura 1, para un satélite 10 colocado en una órbita no estacionaria y provisto de un instrumento 12 de visión hacia el nadir, que captura imágenes de partes sucesivas de la banda 16 del suelo terrestre sobrevolada y observada, gracias a un conjunto de detección situado en el plano focal del instrumento 12 y comprendiendo un detector matricial bidimensional controlado de manera que capture pares de imágenes sucesivas que presenten un solapamiento notable.

60

65

Como variante y como se ha representado en la figura 18, el conjunto de detección en el plano focal 13 puede comprender un único detector 14 de tipo tira que típicamente tenga de 1 (pero preferentemente al menos 2) a unas decenas de líneas 15, que comprenden cada una de 1000 a 10.000 píxeles, por ejemplo, funcionando la tira sobre el principio denominado "empuje y barrido" (push-broom en inglés) y estando orientado en el sentido de las líneas de la imagen que se ha de obtener, es decir que la tira 14 barre la escena observada en una dirección perpendicular a sus líneas, estando el satélite 10 apuntado de tal manera que este detector de tipo tira 14 barre la zona 16 a observar durante las capturas de fotogramas. El procedimiento según la invención se aplica entonces a los pares de imágenes sucesivas, como se ha definido anteriormente o, como variante, este procedimiento se aplica a al menos dos imágenes formadas a partir de al menos dos líneas, por ejemplo, 15₁ y 15₂, del detector de tira 14 de la figura 18.

En este último caso, la elección de las al menos dos líneas 15₁ y 15₂ utilizadas en el detector de tira 14 para formar las al menos dos imágenes se optimiza con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea de visión V en una banda de frecuencia dada.

Como variante, como se ha representado en la figura 19, el conjunto de detección en el plano focal 13 del satélite 10 en órbita no estacionaria de la figura 1 puede comprender varios detectores principales de tipo tira, por ejemplo, tres detectores de tira 14₁, 14₂ y 14₃ que están alineados, es decir, cuyas líneas de píxeles, a partir de las cuales se forman las imágenes que se van a tratar según el procedimiento anterior, son paralelas entre sí de una tira a la otra y por tanto también las columnas, estando los detectores de tira 14₁, 14₂ y 14₃ separados entre sí en una dirección perpendicular a sus líneas por unas desviaciones espaciales ΔX_1 , entre los dos detectores 14₁ y 14₂, ΔX_2 , entre los dos detectores 14₂ y 14₃, y ΔX_3 entre los dos detectores 14₁ y 14₃, de manera que se constituyan tres pares de tiras, de los que dos tiras de cada par están separadas entre sí a una distancia tal que ΔX_1 , ΔX_2 o ΔX_3 de típicamente unas fracciones de milímetros a unos milímetros en el plano focal 13, de manera que estas desviaciones espaciales den como resultado unas desviaciones temporales de las capturas de imágenes a tratar según el procedimiento. Los detectores de tira 14₁, 14₂ y 14₃ observan así aproximadamente la misma parte de la escena, durante una captura de fotograma, con un desfase temporal que depende directamente de la distancia ΔX_1 , ΔX_2 o ΔX_3 entre los detectores de tira 14₁, 14₂ y 14₃ en el plano focal 13.

Además, en esta configuración del conjunto de detección, cada línea 15 de los detectores de tira 14₁, 14₂ y 14₃ puede formar una imagen de la escena y al menos un subconjunto de las imágenes así creadas por el conjunto de detectores del plano focal 13 puede tratarse siguiendo el procedimiento de la invención para restituir la orientación de la línea de visión V del instrumento óptico 12.

Según una alternativa de realización, el conjunto de detección en el plano focal 13 de este instrumento 12 puede estar constituido, como se ha representado esquemáticamente en la figura 20, por un detector principal de tipo tira 14, cuyo número de líneas y número de píxeles por línea son apropiados para la utilización de este detector 14 para garantizar la captura de imágenes según las características deseadas de una misión, por ejemplo, en términos de calidad de imagen, de resolución y/o de ancho de barrido y este detector principal 14 está asociado, en el plano focal 13, a efectos de aplicación del procedimiento según la invención y tal y como se ha definido anteriormente, a al menos un detector dedicado 18, de menor tamaño que el detector principal 14 y típicamente constituido por una matriz de 100X100 píxeles o de una tira de 1000X10 píxeles, y que está colocado a cierta distancia ΔX del detector principal 14 y alineado de manera que las líneas y columnas del detector dedicado 18 sean respectivamente paralelas a las líneas y columnas del detector principal 14. Con la ayuda de estos dos detectores 14 y 18, separados por una desviación espacial ΔX de donde resulta una desviación temporal de las capturas de la imagen a tratar según el procedimiento de la invención, se pueden reconstituir los movimientos de la línea de visión V, y, en el ejemplo del conjunto de detección en el plano focal según la figura 19 o la figura 20, la separación espacial entre los detectores 14₁, 14₂ y 14₃ o 14 y 18, en el plano focal 13, se puede optimizar con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea de visión V en una banda de frecuencia dada.

El procedimiento de la invención también puede aplicarse al cálculo de la orientación de la línea de visión V de un instrumento óptico 12 de captura de fotogramas instalado en un satélite estabilizado en espín 10, como se ha representado esquemáticamente en la figura 16, cuya estabilización está garantizada por la rotación sobre sí mismo, en torno al eje de su plataforma cilíndrica, de manera que la línea de visión V del instrumento 12 esté controlada tal como el conjunto de detección en el plano focal 13 del instrumento 12 y que puede ser un conjunto según una u otra de las figuras 18, 19 y 20, barra una banda de superficie 16 del globo terrestre 17 gracias a la rotación del satélite 10

Como variante, como se ha representado en la figura 17, el barrido de una banda 16 de la superficie del globo terrestre 17 por el conjunto de detección en el plano focal 13 del instrumento óptico 12 instalado en un satélite portador 10 puede garantizarse gracias al barrido de un espejo 34 orientable, colocado sobre el camino óptico del instrumento 12 de captura de fotogramas, oscilando el espejo de barrido 34, en torno a un eje de pivotamiento A fijo con respecto a la plataforma del satélite 10, entre dos posiciones extremas indicadas con trazos de puntos, de manera que la imagen de la banda de suelo 16 se refleje en un espejo cóncavo 35 del instrumento 12, reflejando este espejo 35 esta imagen en un espejo convexo 36 que a su vez enfoca la imagen en el conjunto de detección en el punto focal 13, donde el conjunto de detección puede ser uno u otro de los conjuntos de detección de las figuras 18, 19 y 20, es decir, con un único detector de tipo tira, con varios detectores de tipo tira alineados en al menos un par de tiras separadas espacialmente entre sí y en una asociación de un detector principal de tipo tira con un detector dedicado especialmente separado de este último, como se han descrito anteriormente.

Por último, cabe destacar que, en los casos de aplicación del procedimiento de la invención para calcular y restituir la orientación de la línea de visión de un instrumento óptico de captura de fotogramas en un satélite estabilizado en espín (figura 16) o un satélite portador de un espejo de barrido 34 del instrumento óptico 12 (figura 17), la órbita del

satélite puede ser no estacionaria o geoestacionaria.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de restitución de movimientos de una línea de visión (V) en balanceo, cabeceo y guiñada de un instrumento de observación (12) en el transcurso de la adquisición de imágenes de una duración de típicamente unos segundos por captura de fotograma, deformando dichos movimientos cada imagen en una gama de frecuencias que pueden ir hasta altas frecuencias de unas centenas de Hercios, según el cual, a partir del instrumento (12) montado sobre un portador (10) que se está desplazando, se forman, durante el tiempo de duración [Ti, Tf] de la captura de fotograma, al menos dos imágenes (14a, 14b) que contienen una misma parte de una escena, estando las capturas de estas dos imágenes desfasadas en el tiempo por un valor conocido T sustancialmente constante, y dichos movimientos de la línea de visión (V) del instrumento (12) se determinan en el transcurso de la captura de fotograma al menos mediante las siguientes etapas:

10

15

45

50

- a) una etapa de selección y concordancia de varias zonas características homólogas; siendo cada zona característica una parte de una escena de unos cientos de píxeles que contienen información radiométrica, geométrica o textural, habiéndose capturado dichas zonas características en las inmediaciones de unos momentos Tn y Tn + T (n= 1 a N) respectivamente, distribuidos entre Ti y Tf en dichas imágenes de la misma parte de la escena de manera que se obtenga una medición de la posición en los momentos Tn y Tn+T (n=1 a N) respectivamente, de dichas zonas homólogas o de al menos un punto particular de estas zonas, en cada una de las dos imágenes de dicha parte,
- b) una etapa de cálculo de las variaciones angulares de la línea de visión (V) del instrumento (12) entre los momentos Tn y Tn+T (n=1 a N) por reajuste de un modelo de concordancia de las imágenes, dando dicho modelo para cualquier punto de una primera imagen capturada en el momento Tn (n=1 a N), una estimación de la posición de su punto homólogo en una segunda imagen capturada en el momento Tn+T en función de parámetros que comprenden, en particular, la orientación de la línea de visión (V) del instrumento (12) en el momento Tn y dichas variaciones angulares de esta línea de visión (V) entre Tn y Tn + T; consistiendo el reajuste del modelo en calcular los valores de dichas variaciones angulares que minimizan una función, por ejemplo, cuadrática, unas desviaciones entre la posición de las zonas homólogas de la segunda imagen predichas por el modelo y la posición de dichas zonas homólogas de la segunda imagen tal y como se ha restituido en la etapa (a). v
- 30 c) una etapa de reconstitución de los movimientos de la línea de visión (V) sobre el horizonte de tiempo [Ti, Tf] por integración, filtrado y eventualmente remuestreo del conjunto de variaciones elementales reconstituidas en la etapa (b).
- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que la etapa (a) implementa una concordancia de zonas características de imágenes basada en un parecido geométrico, radiométrico o textural entre al menos dos imágenes adquiridas durante la captura de fotograma.
- 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 y 2, **caracterizado por que** al menos uno de los siguientes métodos se utiliza para seleccionar las zonas características asociadas a una fecha de captura de fotograma Tn dada:
 - selección de los puntos con doble gradiente superior a un umbral dado en una zona de la imagen correspondiente a la captura de fotograma efectuada en las inmediaciones del momento Tn:
 - selección de puntos con unas posiciones predeterminadas independientemente del contenido de la imagen en las inmediaciones de estos puntos, con un rechazo eventual de los puntos para los que un criterio de calidad de concordancia sea inferior a un umbral dado;
 - selección de puntos predeterminados dada por un conocimiento previo de elementos particulares presentes en la escena;
 - selección de un subconjunto de puntos a partir de un conjunto de puntos característicos calculados mediante uno de los métodos anteriores o uno similar, de manera que se maximice la distribución espacial de dichos puntos y la calidad de la concordancia de las zonas características en las inmediaciones de estos puntos;
 - selección de una viñeta de típicamente unas decenas a unas centenas de píxeles en las inmediaciones de los puntos con el fin de mejorar la calidad de la concordancia.
- 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado por que** las imágenes concordadas se capturan en unas bandas espectrales que pueden ser idénticas o diferentes.
 - 5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque**, en la etapa (b), dichas desviaciones que intervienen en el criterio cuadrático que se ha de minimizar se ponderan mediante un escalar positivo proporcional a la calidad estimada de dicha concordancia de dichas zonas características entre las dos imágenes, calculándose la estimación de dicha calidad de concordancia según los métodos del estado de la técnica (cálculo de correlación, por ejemplo).
- 6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque**, en el transcurso de la etapa (c), se efectúa una integración, un filtrado y eventualmente un remuestreo de las estimaciones de variación de actitud procedentes de la etapa (b) para reconstituir los movimientos de la línea de visión del

instrumento, sin la componente absoluta de la orientación del punto de visión, sobre el intervalo de tiempo [Ti, Tf] mediante al menos uno de los siguientes métodos:

- utilizando un filtrado inverso, lo que permite potenciar ciertas frecuencias atenuadas a la vez que se limita el impacto del ruido, por ejemplo, un filtro de Wiener o de Kalman,
- mediante el ajuste de un modelo analítico, por ejemplo, una estimación de los coeficientes de un polinomio que no supere un 5º grado en general, según un método de mínimos cuadrados.
- 7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque, en ausencia de concordancia de suficiente calidad de las zonas características seleccionadas en el momento Tn, ventajosamente, 10 se calcula la orientación de la línea de visión en el momento Tn mediante una interpolación de orientaciones de la línea de visión reconstituidas por la aplicación del procedimiento en unos momentos anteriores y posteriores a Tn.
- 8. Procedimiento según la reivindicación 6 o 7. caracterizado por que se utiliza el conocimiento previo del contenido 15 frecuencial de las variaciones en la orientación de la línea de visión para efectuar antes de la etapa (c) un filtrado reteniendo solo las frecuencias implicadas.
 - 9. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se utiliza un número de imágenes de una misma escena estrictamente superior a dos, se aplica el procedimiento en varios pares de imágenes y se hibridan los resultados obtenidos a partir de diferentes pares de imágenes de la misma escena implementando un afinado global o iterativo del conocimiento actual de la orientación de la línea de visión durante la captura de fotograma.
- 10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado por que se aplica el procedimiento a un primer par de 25 imágenes, ventajosamente, de entre los pares de imágenes que supuestamente están mejor correlacionadas, por ejemplo, las capturadas en una misma banda espectral, con el fin de obtener una primera reconstitución de los movimientos de la línea de visión del instrumento en el transcurso de la captura de fotograma, después se trata otro par de imágenes inicializando el modelo de concordancia a partir de valores de la orientación de la línea de visión calculados en la etapa anterior y así sucesivamente hasta agotar los datos u obtener una convergencia.
 - 11. Procedimiento según la reivindicación 10, caracterizado por que el instrumento permite formar al menos tres imágenes desfasadas en el tiempo, presentando al menos dos de las imágenes una fuerte correlación entre sí y al menos otra imagen débilmente correlacionada con las otras dos y por que se corrigen los movimientos de la línea de visión en al menos una imagen débilmente correlacionada con las otras dos gracias a la reconstitución de dichos movimientos de la línea de visión efectuada aplicando el procedimiento en al menos un par de imágenes que presentan una fuerte correlación entre sí.
- 12. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se inicializa el modelo de concordancia con un conocimiento previo de la orientación de la línea de visión en el transcurso de la 40 captura de fotograma, procediendo dicho conocimiento previo de una consigna de orientación o de una medida derivada de indicadores de actitud tales como unos sensores estelares, girómetros o de un conocimiento sobre la posición absoluta en la superficie del globo terrestre de zonas características reconocibles en la imagen o de una hibridación de tales conocimientos.
- 45 13. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se tienen en cuenta los efectos de paralaje en el modelo de concordancia, utilizando un conocimiento previo del relieve de las escenas observadas.
- 14. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las imágenes se obtienen 50 mediante un detector que funciona según el principio denominado de empuje y barrido.
 - 15. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 en el cálculo de la orientación de la línea de visión (V) de un instrumento óptico (12) de captura de fotogramas instalado a bordo de un satélite (10), caracterizada por que:
 - dicho instrumento (12) comprende en su plano focal (13) al menos un detector de tipo tira (14) de típicamente 1 a unas decenas de líneas (15) y comprendiendo cada una de unos 1.000 a 10.000 píxeles,
 - dicho satélite (10) está colocado en una órbita no estacionaria,
 - se apunta el satélite (10) de tal manera que dicho al menos un detector de tipo tira (14) barre la zona (16) que se ha de observar durante las capturas de fotogramas, y
 - se aplica el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13 para estimar la orientación de la línea de visión (V) del instrumento (12) en el transcurso de una captura de fotograma.
- 16. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 en el cálculo de la orientación 65 de la línea de visión (V) de un instrumento óptico (12) de captura de fotogramas instalado a bordo de un satélite (10), caracterizada por que:

22

5

20

30

35

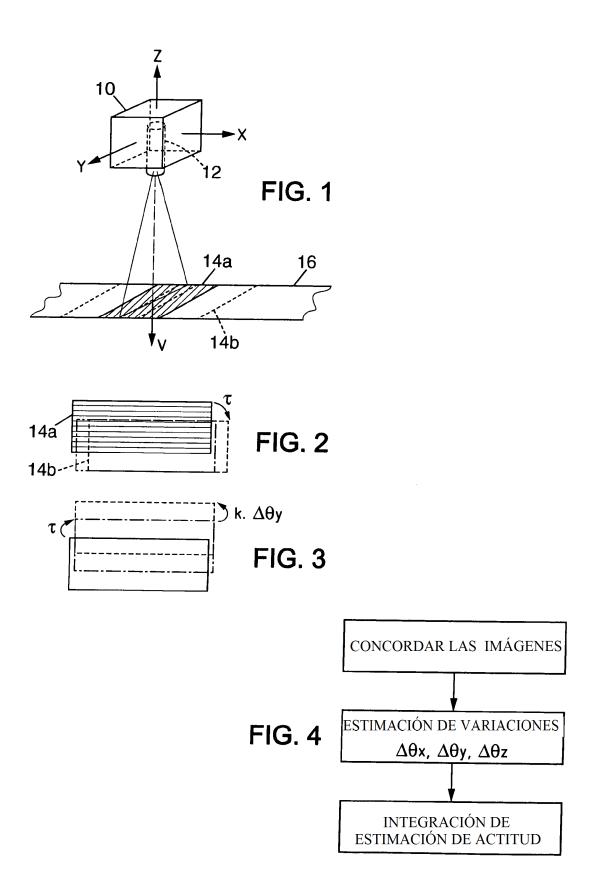
55

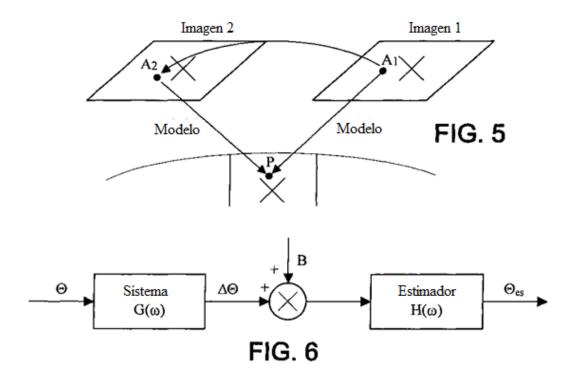
- dicho instrumento (12) consta en su plano focal (13) de al menos un detector de tipo tira (14),

5

10

- la línea de visión (V) del instrumento (12) está controlada de manera que dicho al menos un detector (14) barra la superficie (16) del globo terrestre (17), ya sea por rotación del satélite (10), ya sea gracias al barrido de un espejo orientable (34) colocado en el camino óptico del instrumento (12), y
- se aplica el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13 para estimar la orientación de la línea de visión (V) del instrumento (12) en el transcurso de una captura de fotograma.
- 17. Aplicación del procedimiento según la reivindicación 16, **caracterizada por que** la órbita del satélite (10) es geoestacionaria.
- 18. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17, caracterizada por que
 - dicho instrumento (12) comprende en su plano focal (13) al menos dos detectores de tipo tira, estando las tiras alineadas de manera que sus líneas y columnas sean sustancialmente paralelas respectivamente y estando las dos tiras de cada par de tiras, de las cuales al menos un par está así en el plano focal (13), separadas entre sí a una distancia de típicamente unas fracciones de milímetros en el plano focal (13), observando así los detectores aproximadamente la misma parte de la escena durante una captura de fotograma, con un desfase temporal directamente dependiente de la distancia entre los detectores en el plano focal (13).
- 20 19. Aplicación del procedimiento según una de las reivindicaciones 15 a 18, **caracterizada por que** cada línea (15) de detectores del plano focal forma una imagen de la escena y por que un subconjunto de las imágenes así creadas por el conjunto de detectores del plano focal (13) puede tratarse siguiendo el procedimiento para restituir la orientación de la línea de visión (V) del instrumento (12).
- 25 20. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17, caracterizada por que:
 - el instrumento (12) consta de al menos un detector principal de tipo tira (14) en su plano focal (13), utilizándose este detector (14) para garantizar la captura de imágenes según unas características de misión deseadas (ancho de barrido, resolución, calidad de la imagen, etc.),
- se añade en el plano focal a efectos de aplicación del procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13, al menos un detector dedicado (18), de menor tamaño, típicamente una matriz de 100x100 píxeles o una tira de 1000x10 píxeles y se coloca dicho detector dedicado (18) a cierta distancia de dicho detector principal (14), y
 se aplica el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 14.
- 35 21. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 18 a 20, **caracterizada por que** la separación de los detectores en el plano focal (13) está optimizada con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea (V) de visión en una banda de frecuencia dada.
- 22. Aplicación del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17, **caracterizada por que** no hay más que un único detector (14) en el plano focal (13) barriendo la escena y por que el procedimiento se aplica a al menos dos imágenes (14a, 14b) formadas a partir de al menos dos líneas (15) del detector (14).
- 23. Aplicación del procedimiento según la reivindicación 22 **caracterizada por que** la elección de las al menos dos líneas (15₁, 15₂), del detector (14) utilizadas para formar las al menos dos imágenes se optimiza con vistas a la reconstitución de los movimientos de la línea de visión (V) en una banda de frecuencia dada.





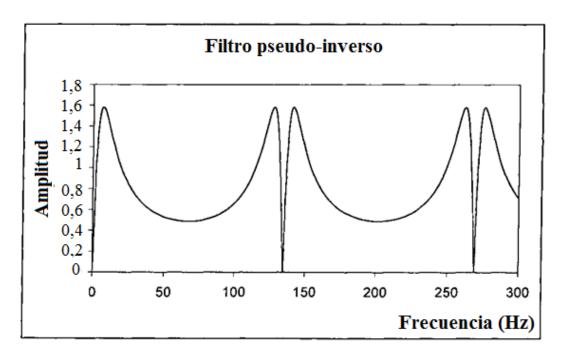
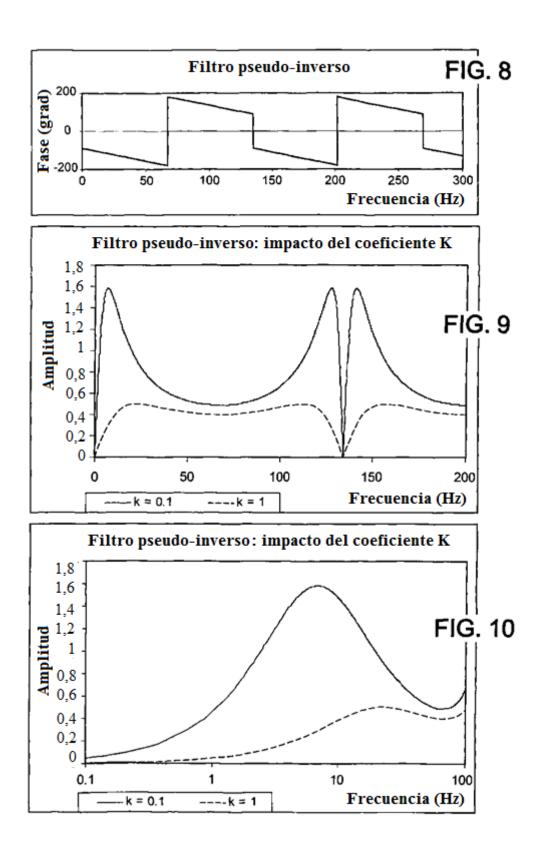


FIG. 7



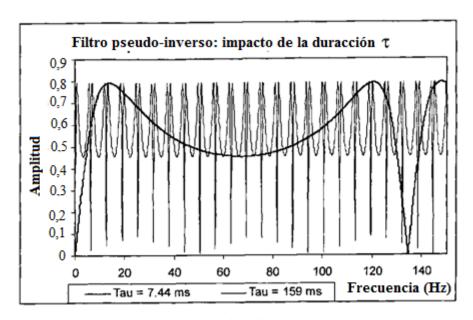


FIG. 11

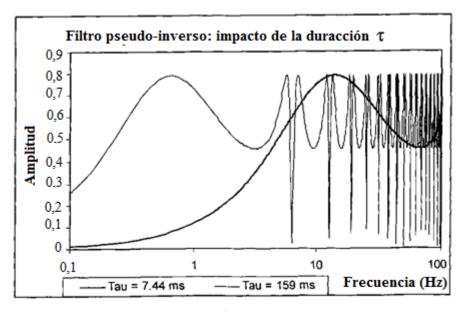


FIG. 12

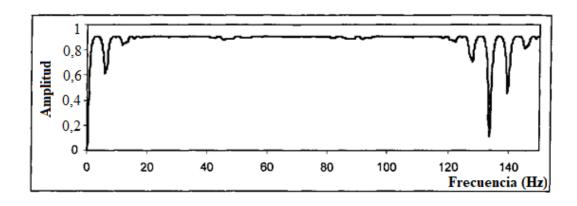


FIG. 13

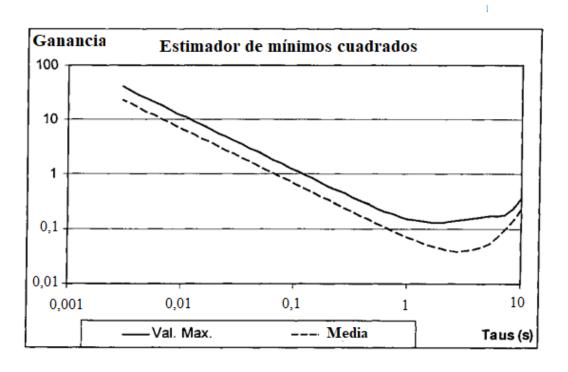


FIG. 14

