

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 799 704**

51 Int. Cl.:

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 25/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.01.2017 PCT/EP2017/050832**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.07.2017 WO17121904**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.01.2017 E 17700448 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.03.2020 EP 3403054**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento de mantenimiento de actitud de un portador que utiliza girómetros**

30 Prioridad:

14.01.2016 FR 1650288

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

21.12.2020

73 Titular/es:

**SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE (100.0%)
18/20 Quai du Point du Jour
92100 Boulogne-Billancourt, FR**

72 Inventor/es:

**BUDIN, JOËL;
PINTURAUD, ARNAUD;
WOISELLE, ARNAUD y
PONSSARD, CLÉMENT**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 799 704 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Dispositivo y procedimiento de mantenimiento de actitud de un portador que utiliza girómetros

Ámbito de la invención

5 La presente invención concierne a un dispositivo y a un procedimiento de mantenimiento de la actitud de un portador que utiliza girómetros.

Estado de la técnica

Para calcular y mantener la actitud de un portador, es conocido utilizar tres girómetros primarios dispuestos para medir velocidades de rotación según tres ejes diferentes, en el transcurso del desplazamiento del portador.

10 A partir de las mediciones adquiridas por los tres girómetros, se calcula un ángulo de rumbo, un ángulo de cabeceo, y un ángulo de balanceo del portador, que definen conjuntamente la actitud del portador en el espacio.

Se conoce igualmente utilizar un girómetro secundario para corregir errores de factor de escala que contaminan las mediciones facilitadas por los girómetros primarios.

Sin embargo, la utilización de tal girómetro no es eficaz para corregir errores de derivas que contaminan las mediciones facilitadas por los girómetros.

15 El documento US 9 170 105 B1 describe un dispositivo de mantenimiento de la actitud de un portador que comprende al menos tres giroscopios primarios y al menos un giroscopio secundario de eje sensiblemente diferente de los ejes de los giroscopios primarios así como un sensor de estrella. El dispositivo estima los errores de sesgo de los giroscopios primarios utilizando mediciones facilitadas por el conjunto de los giroscopios y el sensor de estrella.

20 Por otra parte, el documento "MYUNG HWANGBO ET AL: "IMU Self-Calibration Using Factorization" IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS" divulga un dispositivo de autocalibración de una central inercial que comprende una unidad inercial primaria dispuesta para medir velocidades de rotación primarias de un portador alrededor de tres ejes primarios y una unidad inercial secundaria similar a la unidad primaria y dispuesta para medir una velocidad de rotación secundaria del portador alrededor de un eje secundario diferente de cada uno de los ejes primarios, una cámara que presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios y un módulo de tratamiento de datos configurado para estimar errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias con la ayuda de datos de la velocidad de rotación secundaria y de imágenes adquiridas por la cámara.

Exposición de la invención

La invención se propone por tanto mantener la actitud de un portador con una precisión mejorada con respecto a las soluciones propuestas en el estado de la técnica.

30 Se propone entonces, según un primer aspecto, un dispositivo de mantenimiento de actitud de un portador, según la reivindicación 1, comprendiendo el dispositivo;

- tres girómetros primarios dispuestos para medir velocidades de rotación primarias de un portador alrededor de tres ejes primarios,
- un girómetro secundario dispuesto para medir una velocidad de rotación secundaria del portador alrededor de un eje secundario diferente de cada uno de los ejes primarios,
- una cámara que presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios,
- un módulo de tratamiento de datos configurado para
 - estimar errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias con la ayuda de datos de la velocidad de rotación secundaria y de imágenes adquiridas por la cámara, y
 - corregir las velocidades de rotación primarias con los citados errores estimados

40 En la presente invención, la cámara y el girómetro secundario se combinan de modo sinérgico. En efecto, la explotación combinada de la velocidad de rotación facilitada por el girómetro secundario y de las velocidades adquiridas por la cámara permite corregir no solamente errores de factor de escala que contaminan las velocidades de rotación medidas por los girómetros primarios, sino igualmente corregir errores de deriva.

45 Las velocidades de rotación medidas por los girómetros primarios son así corregidas de modo más preciso que con un dispositivo con cuatro girómetros.

Según la invención, el girómetro secundario es elegido de un tipo adaptado para suscitar errores de factor de escala y/o errores de deriva en la velocidad de rotación secundaria que son inferiores a los suscitados por los girómetros primarios en las velocidades de rotación primarias.

5 El dispositivo según el primer aspecto de la invención puede ser completado con las características opcionales siguientes tomadas solas o en combinación cuando esto sea técnicamente posible.

- El módulo de tratamiento de datos comprende un filtro de hibridación, tal como un filtro de Kalman, configurado para estimar los errores de factor de escala y de deriva a partir de los datos de la velocidad de rotación secundaria y de imágenes adquiridas por la cámara,
- El eje óptico de la cámara es paralelo al eje secundario.

10 • El girómetro secundario es de tipo semiesférico vibratorio y/o los girómetros primarios son de tipo MEMS.

- Los tres ejes primarios son ortogonales dos a dos, y el eje secundario forma un ángulo de 54,7 grados con cada eje primario.

Se propone igualmente, según un segundo aspecto, un procedimiento de mantenimiento de actitud de un portador, según la reivindicación 7, que comprende las etapas de:

15 • medición de tres velocidades de rotación del portador alrededor de tres ejes primarios secantes dos a dos con la ayuda de tres girómetros primarios,

- medición de una velocidad de rotación alrededor de un eje secundario secante con cada uno de los ejes primarios con la ayuda de un girómetro secundario,

estando caracterizado el procedimiento por las etapas de:

20 • adquisición de imágenes con la ayuda de una cámara que presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios,

- estimación de errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias, con la ayuda de datos de la velocidad de rotación secundaria y de las imágenes adquiridas por la cámara,
- corrección de las velocidades de rotación primarias con la ayuda de los citados errores estimados.

25 El procedimiento según el segundo aspecto de la invención puede ser completado con las características opcionales siguientes tomadas solas o en combinación cuando esto sea técnicamente posible.

30 • La estimación de los errores de factor de escala y de deriva es puesta en práctica por un filtro de hibridación, tal como un filtro de Kalman, por medio de datos de observación que dependen de un desvío δ entre una velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación secundaria, y una velocidad de rotación del portador alrededor del eje secundario deducida de las velocidades de rotación primarias.

• La velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación secundaria es una velocidad resultante de una corrección de la velocidad de rotación secundaria por medio de errores suscitados por el girómetro secundario previamente estimados por el filtro de hibridación.

35 • El procedimiento comprende la estimación de una velocidad de rotación, denominada velocidad de rotación de la cámara, y que es obtenida por análisis de las imágenes adquiridas por la cámara, dependiendo la corrección de los errores de factor de escala y de deriva de esta velocidad de rotación de la cámara estimada.

40 • La estimación de los errores de factor de escala y de deriva es puesta en práctica por medio de datos de observación que dependen de un desvío ϵ entre una velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación de la cámara, y una velocidad de rotación del portador vista por la cámara deducida de las velocidades de rotación primarias.

45 • El procedimiento comprende por otra parte etapas de estimación de un error de focal suscitado por la cámara, y de corrección, con la ayuda del error de focal, de la velocidad de rotación de la cámara obtenida por análisis de imágenes adquiridas por la cámara, de modo que se produzca una velocidad de rotación de la cámara corregida, en el cual la velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación de la cámara estimada utilizada para calcular el desvío ϵ es la velocidad de rotación de la cámara corregida.

• El procedimiento comprende además etapas de cálculo de un índice de confianza sobre la medición de un flujo óptico en las imágenes adquiridas por la cámara, y de comparación del índice con un umbral predeterminado, siendo puesta en práctica o no la etapa de corrección de las velocidades de rotación primarias en función del resultado de esta comparación.

- Las velocidades de rotación primarias Rbc son corregidas por aplicación de la fórmula siguiente:

$$\begin{bmatrix} febc1 & 0 & 0 \\ 0 & febc2 & 0 \\ 0 & 0 & febc3 \end{bmatrix} \cdot Rbc - \begin{bmatrix} dbc1 \\ dbc2 \\ dbc3 \end{bmatrix}$$

donde febc1, febc2, febc3 son los errores de factor de escala y dbc1, dbc2 y dbc3 son los errores de deriva.

- El procedimiento comprende además una etapa de integración que produce datos de actitud del portador a partir de las velocidades de rotación primarias corregidas.
- El procedimiento comprende además el cálculo de tres velocidades de rotación denominadas recompuestas a partir de las velocidades siguientes: las velocidades de corrección primarias corregidas con la ayuda de los errores de factor de escala y de deriva estimados, la velocidad resultante de la corrección de la velocidad de rotación secundaria, siendo una de las velocidades de rotación recompuestas una velocidad de rotación alrededor del eje secundario, y en el cual los datos de actitud del portador son producidos por integración de las velocidades de rotación recompuestas.
- El procedimiento comprende además las etapas de estimación de errores de actitud del portador, y de corrección de los datos de actitud producidos por medio de errores de actitud estimados.

Descripción de las figuras

- Otras características, objetivos y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto en la descripción que sigue, la cual es puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe ser leída en relación con los dibujos anejos, en los cuales:
 - La figura 1 ilustra de modo esquemático un dispositivo de mantenimiento de actitud según un modo de realización de la invención;
 - La figura 2 muestra la orientación en el espacio de ejes particulares del dispositivo de la figura 1;
 - La figura 3 es un organigrama de etapas de un procedimiento de medición de actitud puestas en práctica por el dispositivo según la figura 1;
 - Las figuras 4, 5 y 6 son organigramas de etapa de tratamientos realizados en mediciones adquiridas por el dispositivo de la figura 1, según tres modos de realización diferentes de la invención.

En el conjunto de las figuras, los elementos similares llevan referencias idénticas.

Descripción detallada de la invención

A) Dispositivo de mantenimiento de actitud

En referencia a la figura 1, un dispositivo de mantenimiento de actitud de un portador comprende tres girómetros primarios 1, 2, 3, un girómetro secundario 4, una cámara 5 y un módulo de tratamiento de datos 6.

- Los tres girómetros primarios 1, 2, 3 están dispuestos para medir velocidades de rotación primarias del portador alrededor de tres ejes primarios diferentes.

Los tres ejes son por ejemplo secantes dos a dos. En otras palabras, uno de los ejes no está incluido en el plano definido por los otros dos ejes.

Se considera en lo que sigue el ejemplo no limitativo de girómetros primarios 1, 2, 3 orientados tales que los tres ejes primarios son sensiblemente ortogonales dos a dos.

- Los girómetros primarios 1, 2, 3 forman conjuntamente tradicionalmente un « triedro » de girómetros.

El girómetro secundario 4 está dispuesto para medir una velocidad de rotación secundaria del portador alrededor de un eje secundario diferente de cada uno de los ejes primarios.

- El girómetro secundario 4 está por ejemplo orientado de modo que su eje secundario forma el mismo ángulo con cada uno de los ejes primarios, o sea 54,7º aproximadamente. Se dice igualmente que el eje del girómetro está orientado en una diagonal del triedro de girómetros primarios.

Por otra parte, la cámara 5 presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios.

El módulo de tratamiento de datos 6 está configurado para producir datos de actitud del portador a partir de las velocidades medidas por los girómetros 1, 2, 3, 4 y de las imágenes adquiridas por la cámara 5.

El módulo de tratamiento de datos 6 comprende al menos un procesador configurado para poner en práctica instrucciones de código de programa.

5 En particular, el procesador del módulo de tratamiento 6 está configurado para ejecutar un algoritmo de análisis del contenido de las imágenes captadas por la cámara 5, por ejemplo un algoritmo de medición de flujo óptico en estas imágenes.

El procesador del módulo de tratamiento 6 está por otra parte configurado para poner en práctica un filtro de hibridación sobre la base de los datos facilitados por los girómetros y el algoritmo de análisis.

Por ejemplo, el filtro de hibridación, cuyo funcionamiento se describirá en lo que sigue, puede ser un filtro de Kalman. Preferentemente, el filtro de Kalman utilizado es de tipo extendido.

10 Los datos de salida del dispositivo son los datos de actitud producidos por el módulo de tratamiento 6.

15 El eje óptico es preferentemente paralelo al eje secundario, lo que presenta la ventaja de disponer según el eje óptico –que es el eje de baja eficiencia del triedro « visión » - de la mejor medición girométrica por hibridación de las mediciones girométricas (esta hibridación se detallará más adelante). En efecto, el eje secundario está privilegiado puesto que los 3 ejes primarios le aportan una redundancia de información mientras que inversamente, el eje secundario solo aporta una redundancia de información según cada uno de los 3 ejes primarios (como recordatorio ortogonales entre sí).

Naturalmente, los errores de sensores de los girómetros primarios tienen una repercusión sobre los datos de actitud que son producidos por el módulo de tratamiento de datos.

20 Cualquier girómetro está sujeto a errores de sensores que contaminan las velocidades de rotación que el mismo proporciona. Estos errores de sensores comprenden especialmente errores de factores de escala y errores de deriva. De esta manera, los girómetros se clasifican tradicionalmente según su precisión, es decir según el valor de error de factor de escala y/o de deriva que se puede encontrar en las mediciones adquiridas con estos girómetros.

25 En el dispositivo de mantenimiento de actitud según la invención, el girómetro secundario 4 es elegido de un tipo adaptado para suscitar errores de factor de escala y/o errores de deriva inferiores a los suscitados por los girómetros primarios 1, 2, 3.

En lo que sigue se toma el ejemplo de girómetros primarios ejemplo de tipo MEMS, es decir girómetros de estructura vibratoria micromecánica.

30 Los girómetros de tipo « MEMS », ocasionan errores de factor de escala y de deriva importantes. En particular, el error de factor de escala de un girómetro MEMS típico actual es de la clase 3000 ppm a 10000 ppm. Así, un error de factor de escala de 10000 ppm ocasiona un error de rumbo de 1,8° para un excursión de 180°. La estabilidad de deriva (término técnico bajo de la varianza de Allan) es de la clase 10° /h.

Sin embargo, los girómetros de tipo MEMS presentan la ventaja de ser económicos y muy compactos. Además, a pesar del valor relativamente elevado de sus errores de factores de escala, los mismos pueden ser corregidos eficazmente por el girómetro secundario cuando éste es elegido de precisión superior.

35 El girómetro secundario es por ejemplo un girómetro semiesférico vibratorio (GRH).

B) Principio general de corrección de errores de factor de escala de los girómetros primarios con la ayuda del girómetro secundario

En lo que sigue se presenta el principio de funcionamiento teórico del dispositivo de mantenimiento de actitud.

Los cuatro girómetros 1, 2, 3, 4 definen conjuntamente una arquitectura inercial heterogénea.

40 El girómetro secundario 4 está configurado para observar una mezcla de los errores que contaminan las mediciones adquiridas por los girómetros primarios 1, 2, 3. Este concepto permite acceder entre otros a una combinación lineal de los factores de escala suscitados por los girómetros primarios 1, 2, 3, 4 cuando el portador [p] está en movimiento de rotación, es decir cuando los errores de factores de escala son preponderantes.

45 De modo no limitativo pero para simplificar la exposición del principio general de corrección general de errores de factor de escala en las mediciones realizadas por los girómetros, se considera que la medición de velocidad de rotación medida por el girómetro secundario 4, indicada por Rhp, está contaminada de un error despreciable.

El triedro formado por los tres girómetros primarios 1, 2, 3 de ejes {Gbc1, Gbc2, Gbc3} efectúa mediciones de

velocidades de rotación $Rbc = \begin{bmatrix} Rbc1 \\ Rbc2 \\ Rbc3 \end{bmatrix}$.

ES 2 799 704 T3

Se define un sistema de referencia ortonormal virtual de origen G_0 y de ejes $\{G_1, G_2, G_3\}$ en el que la diagonal de cubo es exactamente el eje G_{hp} . Las velocidades de rotación verdaderas según los tres ejes de este triedro perfecto están indicadas por $R = \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix}$.

Se tiene:

$$5 \quad R_{hp} = \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Por otra parte, los tres ejes $\{G_{bc1}, G_{bc2}, G_{bc3}\}$ no están confundidos con los ejes del triedro $\{G_1, G_2, G_3\}$. Los tres girómetros 1, 2, 3 orientados según los ejes $\{G_{bc1}, G_{bc2}, G_{bc3}\}$ efectúan mediciones contaminadas de un error de factor de escala y de un error de deriva.

10 Sea K_{bc} la matriz 3x3 que contiene en su diagonal las correcciones de los errores de factores de escala y fuera de diagonal los términos de corrección de errores de ajuste de los ejes $\{G_{bc1}, G_{bc2}, G_{bc3}\}$ con respecto a los ejes $\{G_1, G_2, G_3\}$.

$$K_{bc} = \begin{bmatrix} 1 + febc1 & cbc12 & cbc13 \\ cbc21 & 1 + febc2 & cbc23 \\ cbc31 & cbc32 & 1 + febc3 \end{bmatrix}$$

Sea $dbc = \begin{bmatrix} dbc1 \\ dbc2 \\ dbc3 \end{bmatrix}$ el vector columna que contiene los términos de deriva de los tres girómetros primarios 1, 2, 3.

Se tiene la ecuación siguiente que relaciona las rotaciones verdaderas R con las rotaciones medidas R_{bc} :

$$15 \quad K_{bc} \cdot R_{bc} - dbc = R \quad (2)$$

Por otra parte, se define δ como un desvío entre la medición R_{hp} efectuada por el girómetro secundario 4, y una información equivalente deducida de las mediciones facilitadas por el triedro de girómetros primarios 1, 2, 3:

$$\delta = R_{hp} - \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R_{bc}}{\sqrt{3}} = \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R}{\sqrt{3}} - \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

De donde, inyectando (2) en (3):

$$20 \quad \delta = \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot [K_{bc} \cdot R_{bc} - dbc]}{\sqrt{3}} - \frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R_{bc}}{\sqrt{3}}$$

Se obtiene finalmente:

$$\delta = R_{bc}^T \cdot \begin{bmatrix} febc1 + kbc21 + kbc31 \\ febc2 + kbc12 + kbc32 \\ febc3 + kbc13 + kbc23 \end{bmatrix} - [1 \ 1 \ 1] \cdot dbc$$

25 En consecuencia, bajo la hipótesis de que los correctores de factores de escala $febc1, febc2, febc3$ son de la clase 3000 ppm, y que se conocen los ajustes con 0,5 mrad, y que los términos de derivas son de la clase $20^\circ/h$ o sea $0,005^\circ/s$ se puede hacer la aproximación:

$$\delta = R_{bc}^T \begin{bmatrix} febc1 \\ febc2 \\ febc3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Por consiguiente, si se apilan en columna varias realizaciones, se obtiene un sistema sobre determinado:

$$\Delta = A \cdot \begin{bmatrix} febc1 \\ febc2 \\ febc3 \end{bmatrix}$$

30 Donde Δ es un apilamiento en columna de varias realizaciones de δ , y A un apilamiento en columnas de varias realizaciones del vector línea R_{bc}^T .

Los elementos que preceden muestran por consiguiente que es posible identificar, en los errores de derivas y ajustes de ejes casi despreciables en la ecuación (4), los factores de escala de los girómetros primarios 1, 2, 3 gracias al girómetro secundario 4.

C) Principio general de corrección de errores de deriva de los girómetros primarios con la ayuda de la cámara

Como complemento de los cuatro girómetros 1, 2, 3, 4, la adición de la cámara 5 permite aumentar el rendimiento del dispositivo de mantenimiento de actitud.

La cámara 5 está configurada para ser utilizada como descripción de ego-movimiento, por la utilización de un algoritmo de resolución del flujo óptico global de las imágenes captadas por la cámara 5.

- 5 Se verá en lo que sigue que la cámara 5 facilita informaciones de visión Rvi que se combinan con las mediciones facilitadas por los girómetros 1, 2, 3, 4.

El algoritmo de medición del flujo óptico global utilizado por la cámara 5 facilita un índice de confianza sobre su medición, que permite modular su influencia sobre la solución de actitud en función de su disponibilidad: contenido explotable en las imágenes, verosimilitud del resultado obtenido. Concretamente, se analiza la cantidad de píxeles explotables en la imagen, así como el valor de la imagen formada por la sustracción de las dos imágenes reajustadas entre sí.

10

En un modo de realización, la observación de visión Rvi puede ser o no tenida en cuenta en función de la comparación con un umbral predefinido de este índice de confianza del flujo óptico medido.

- 15 Se considera que la cámara 5 efectúa una medición exenta de error de deriva: la medición es efectuada entre pares de imágenes; una de las dos imágenes es denominada de « referencia », y la otra de « prueba ». La imagen de « prueba » es la imagen corriente.

La imagen de « referencia » cambia únicamente cuando esto es necesario, y típicamente permanece invariable en una fase de observación de escena con pequeños movimientos (inferiores al cuarto del campo de visualización). En la práctica, se considera que la « referencia » cambia suficientemente poco para que se pueda desprestigiar la deriva en la medición del movimiento de rotación por la cámara 5.

20

Considérese un sistema de referencia ortonormal de origen VO y de ejes {V1, V2, V3}, siendo VO el centro óptico, siendo V1 el eje óptico. Debe observarse que este eje es colineal con el eje Ghp giro de alta eficiencia definido precedentemente salvo una traslación correspondiente al desvío entre el origen del sistema de referencia GO y el origen del sistema de referencia VO.

- 25 Se considera que el sistema de referencia ortonormal {VO, V1, V2, V3} es el sistema de referencia fijado al portador [p]. En el contexto de un mantenimiento de la actitud del citado aparato, se calculan los rumbo, cabeceo y balanceo $\begin{bmatrix} c \\ t \\ r \end{bmatrix}$ y permiten un cambio de sistema de referencia entre el sistema de referencia del portador [p] y el sistema de referencia geográfico [g]. Sea Tgp la matriz de cambio de sistema de referencia [g] hacia [p], que se obtiene directamente a partir de $\begin{bmatrix} c \\ t \\ r \end{bmatrix}$ y que no se tiene necesidad de detallar aquí.

- 30 El triedro formado por el eje secundario y la cámara {Gvi1, Gvi2, Gvi3} efectúa mediciones de velocidades de rotación $Rvi = \begin{bmatrix} Rvi1 \\ Rvi2 \\ Rvi3 \end{bmatrix}$.

Rvi es aquí un vector de velocidades de rotación que comprende 3 componentes, de las cuales una componente es una velocidad de rotación alrededor del eje óptico.

- 35 Sea kvi la matriz 3x3 que contiene en su diagonal las correcciones de los errores de factores de escala y fuera de diagonal los términos de corrección de errores de ajuste de los ejes de visión {Gvi1, Gvi2, Gvi3} con respecto a los ejes {V1, V2, V3}.

$$Kvi = \begin{bmatrix} 1 + fevi1 & cvi12 & cvi13 \\ cvi21 & 1 + fevi2 & cvi23 \\ cvi31 & cvi32 & 1 + fevi3 \end{bmatrix}$$

- 40 Debe observarse que se considera la matriz de píxeles como perfectamente cuadrada y conocida, lo que implica que los errores de factores de escala según los ejes V1 y V2 son idénticos e iguales al desconocimiento de la distancia focal.

Debe observarse que la cámara 5 mide rotaciones con respecto al sistema de referencia terrestre y no con respecto al sistema de referencia inercial como los giróscopos. Sea Rt el vector de rotación terrestre expresado – y conocido – en el sistema de referencia [g].

- 45 Se tiene la ecuación siguiente que relaciona las rotaciones inerciales verdaderas V en el sistema de referencia {VO, V1, V2, V3} con las rotaciones medidas Rvi:

$$Kvi.Rvi = V - Tgp^T.Rt \quad (5)$$

El triedro {V1, V2, V3} se obtiene aplicando tres rotaciones al triedro {G1, G2, G3} virtual definido anteriormente:

- Una rotación de 45° según G3, para formar un triedro que se denominará {G1bis, G2bis, G3bis}
- Una rotación de $-\arctg\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \approx 35,26^\circ$ según G2bis, para formar el triedro {G1ter, G2ter, G3ter}
- Después una rotación de 165° según G1ter, para formar el triedro {V1, V2, V3}

5 La relación entre las rotaciones inerciales verdaderas V en el sistema de referencia virtual visión {V0, V1, V2, V3} y las rotaciones verdaderas R en el sistema de referencia inercial virtual {G0, G1, G2, G3} es:

$$R = Tgyvi.V \quad (6)$$

Donde $Tgyvi = \begin{bmatrix} 0,5744 & 0,5744 & 0,5744 \\ 0,5744 & -0,7887 & 0,2113 \\ 0,5744 & 0,2113 & -0,7887 \end{bmatrix}$

10 Se define ahora ε como el desvío entre la medición $Rvi = \begin{bmatrix} Rvi1 \\ Rvi2 \\ Rvi3 \end{bmatrix}$ efectuada por el triedro visión, y la información equivalente reconstruida por el triedro de girómetros primarios:

$$\varepsilon = Tgyvi^T.Rbc - Tgp^T.Rt - Rvi$$

$$\varepsilon = Tgyvi^T.Rbc - Tgp^T.Rt - \frac{Tgyvi^T(Kbc.Rbc - dbc) - Tgp^T.Rt}{Kvi}$$

Considerando ahora que $Kvi = Id + \begin{bmatrix} fevi1 & cvi12 & cvi13 \\ cvi21 & fevi2 & cvi23 \\ cvi31 & cvi32 & fevi3 \end{bmatrix} = Id + kvi$, así como que $Kbc = Id +$

$$\begin{bmatrix} febc1 & cbc12 & cbc13 \\ cbc21 & febc2 & cbc23 \\ cbc31 & cbc32 & febc3 \end{bmatrix} = Id + kbc$$
, y el desarrollo limitado $\frac{1}{Kvi} = Id - kvi$

15
$$\varepsilon = Tgyvi^T.Rbc - Tgp^T.Rt - (Id - kvi).(Tgyvi^T((Id + kbc).Rbc - dbc) - Tgp^T.Rt) \quad (7)$$

Si se considera ahora una fase de utilización del aparato con movimientos de actitudes pequeñas, típicamente una fase de observación de un punto fijo del paisaje, y la suma por ejemplo en 10 s de ε . Se considera que en 10 s la variación de actitud no sobrepasa 0,1°. Esto significa que en la integral de ε los términos de Rbc no sobrepasan la clase 50°/h, lo que implica que los términos del segundo orden producidos entre los términos de las matrices kbc y kvi que no exceden de 0,01, y los términos de Rbc, no exceden de 0,5°/h. De la misma manera, la rotación terrestre de 15°/h multiplicada por los términos de kvi son de la clase 0,15°/h. Estos valores deben ponerse con respecto a los valores de derivas de los girómetros de bajo coste, de la clase 20°/h. Se puede entonces en la ecuación (7) despreciar los términos del segundo y tercer orden $Tgyvi^T.kbc.Rbc$, $kvi.Tgyvi^T.Rbc$, $kvi.Tgyvi^T.kbc.Rbc$, $kvi.Tgyvi^T.dbc$, y finalmente $kvi.Tgp^T.Rt$, para obtener:

25
$$\varepsilon = Tgyvi^T.dbc \quad (8)$$

Dicho de otro modo, la comparación de la medición de visión y de la información equivalente reconstituida por los girómetros primarios permite observar los términos de derivas de los girómetros primarios, despreciando en la ecuación (8) los términos del segundo orden dependientes de las velocidades de rotación y de los errores de ajuste de los triedros.

30 D) Procedimiento de mantenimiento de actitud de un portador

Los principios generales expuestos en las secciones B) y C) que preceden pueden ser utilizados para implementar un procedimiento de mantenimiento de actitud puesto en práctica por el dispositivo de mantenimiento representado esquemáticamente en las figuras 1 y 2.

Se representa la actitud del portador [p] como el vector que comprende rotaciones de rumbo, de cabeceo y de balanceo

35
$$\begin{bmatrix} c \\ t \\ r \end{bmatrix}$$

En referencia a la figura 3, en una etapa 100, los tres girómetros primarios 1, 2, 3 miden las tres velocidades de rotación Rbc1, Rbc2, Rbc3 del portador alrededor de los tres ejes primarios.

Estas velocidades son reagrupadas en el vector $Rbc = \begin{bmatrix} Rbc1 \\ Rbc2 \\ Rbc3 \end{bmatrix}$.

Por otra parte, el girómetro secundario 4 mide, en una etapa 102 una velocidad de rotación R_{hp} del portador alrededor de su eje secundario, que es secante con cada uno de los ejes primarios.

En una etapa 104, la cámara 5 adquiere imágenes.

En una etapa 106, se pone en práctica un análisis de las imágenes captadas por la cámara 5 de modo que se produzca

5 una estimación de la velocidad de rotación del portador en el espacio en forma del vector $R_{vi} = \begin{bmatrix} R_{vi1} \\ R_{vi2} \\ R_{vi3} \end{bmatrix}$.

El análisis de las imágenes puede ser puesto en práctica por medio de un algoritmo de medición de un flujo óptico en estas imágenes, como se indicó anteriormente en la sección C).

Se transmiten al módulo de tratamiento 6 los datos de rotación siguientes:

- R_{bc} (facilitados por los girómetros primarios 1, 2, 3)
- 10 • R_{hp} (facilitados por el girómetro secundario 4),
- R_{vi} (provenientes del análisis de las imágenes captadas por la cámara 5).

Estos datos son tratados por el módulo de tratamiento 6 para producir una medición de la actitud del portador.

En un primer modo de realización de tratamiento ilustrado en la figura 4, el módulo de tratamiento 6 aplica los tratamientos siguientes.

15 El módulo de tratamiento 6 estima 200 los errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias, con la ayuda de la velocidad de rotación secundaria R_{hp} y de los datos R_{vi} de las imágenes adquiridas por la cámara 5.

La estimación 200 de los errores de factor de escala y de deriva es puesta en práctica por el filtro de hibridación ejecutado por al menos un procesador del módulo de tratamiento 6.

20 El filtro de hibridación facilita además una estimación de error de actitud: un error de rumbo dc , un error de balanceo dr , y un error de cabeceo dt .

En una etapa 202, el módulo de tratamiento 6 calcula una velocidad de rotación secundaria del portador alrededor del eje secundario a partir de las velocidades de rotación primarias R_{bc} , constituyendo esta velocidad así calculada una información redundante con respecto a la velocidad de rotación R_{hp} facilitada por el girómetro secundario 4.

25 En el caso en que los ejes primarios sean ortogonales dos a dos y que el eje secundario esté orientado diagonalmente con respecto a los ejes primarios, esta velocidad redundante se escribe $\frac{[1 \ 1 \ 1] \cdot R_{bc}}{\sqrt{3}}$, como se indicó anteriormente en la sección B.

30 El módulo de tratamiento 6 calcula por otra parte un vector de rotación de la cámara 5, a partir de las velocidades de rotación primarias R_{bc} , que constituye una información redundante con respecto a la velocidad R_{vi} , obtenida por análisis de las imágenes captadas por la cámara 5.

En una etapa 204, el módulo de tratamiento 6 calcula el desvío δ entre la velocidad de rotación secundaria medida por el girómetro secundario 4 y la velocidad de rotación secundaria estimada que constituye una información redundante.

35 En una etapa 206, el módulo de tratamiento 6 calcula el desvío ϵ entre la velocidad de rotación alrededor del eje óptico de la cámara 5, deducida de las imágenes captadas por la misma, y la velocidad de rotación redundante alrededor del mismo eje óptico, estimada con la ayuda de las mediciones de velocidad primaria R_{bc} .

En el caso en que los ejes primarios sean ortogonales dos a dos y que el eje secundario esté orientado diagonalmente con respecto a los ejes primarios, el desvío ϵ puede ser calculado según la fórmula (7) anteriormente mencionada en la sección C).

40 Los desvíos de velocidad δ y ϵ son integrados temporalmente en etapas 208 y 210, y después los resultados $\int \delta$ e $\int \epsilon$ de estas integraciones temporales son utilizados por el filtro de hibridación para estimar 200 los errores de factor de escala y los errores de deriva que contaminan las mediciones de velocidad de rotación primarias.

Como se indicó anteriormente, el filtro de hibridación puede ser un filtro de Kalman, que es un estimador simple de poner en práctica.

45 En un modo de realización particular, este filtro de Kalman pone en práctica las ecuaciones siguientes de evolución y de observación:

$$H(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Después de la etapa de estimación 200 puesta en práctica por medio del filtro de hibridación, el módulo de tratamiento 6 corrige 212 los datos de velocidad Rbc con la ayuda de las estimaciones de error de factor de escala y de deriva producido por este filtro de hibridación.

Esta corrección 212 es puesta en práctica típicamente por aplicación de la fórmula siguiente:

$$\begin{bmatrix} febc1 & 0 & 0 \\ 0 & febc2 & 0 \\ 0 & 0 & febc3 \end{bmatrix} \cdot Rbc - \begin{bmatrix} dbc1 \\ dbc2 \\ dbc3 \end{bmatrix}$$

El resultado de esta fórmula constituye un vector de velocidades primarias corregidas con respecto a las velocidades primarias Rbc facilitadas por el triedro de girómetros primarios.

En un modo de realización, los cálculos de las informaciones redundantes que permiten llegar a los desvíos δ y ϵ no se ponen en práctica sobre la base de los datos de velocidad Rbc facilitados directamente por los girómetros primarios (y por tanto contaminados de errores de sensores de factor de escala y de deriva), sino sobre la base de las velocidades primarias corregidas.

En otras palabras, el filtro de hibridación funciona con la ayuda de un bucle de los errores de sensores de los girómetros primarios 1, 2, 3.

En una etapa 214, el módulo de tratamiento integra las velocidades de rotación corregidas obtenidas a través de la etapa de corrección 212, de modo que se obtenga una primera estimación $\begin{bmatrix} c \\ t \\ r \end{bmatrix}$ de la actitud del portador.

En una etapa 216, el módulo de tratamiento 6 aplica un tratamiento de corrección de esta primera estimación de actitud por medio de los errores de actitud dc, dr, dt producidos por el filtro de hibridación. En otras palabras, se pone en práctica por el filtro de Kalman un bucle de los errores de actitud.

El tratamiento de corrección de la etapa 216 produce así una actitud del portador filtrada, más precisa que la primera estimación de esta actitud.

El filtro de Kalman efectúa un bucle de los errores de sensores y de los errores de integración de actitud, a una frecuencia más lenta que la frecuencia de integración de actitud. Durante un nuevo bucle, los términos del vector de estado X son puestos a cero.

Hay que observar que el índice de confianza de la medición de visión Rvi no está representado en la figura 4. Una puesta en práctica simple puede consistir en ignorar la medición de visión Rvi en el proceso cuando el índice de confianza del flujo óptico sobrepasa un umbral predeterminado. En este caso, no hay observación de visión Rvi disponible, y el filtro de Kalman « espera » a una próxima observación disponible para las correcciones de errores de actitud y de errores de sensores dependientes de la visión.

En el modo de realización ilustrado en la figura 4, el filtro de hibridación utilizado es relativamente simple. Sin embargo, puede ser construido un filtro de hibridación más elaborado, con un vector de estado X que contenga el conjunto de los errores de todos los sensores utilizados (girómetros 1, 2, 3, 4 y cámara 5), derivas, factores de escala y ajustes de ejes, y construyendo la matriz de evolución F(X) con todas las interdependencias correspondientes. Se elabora así una corrección de los errores de sensores y de actitud global, coherente y óptima. En particular, en un modo de realización puede ser pertinente estimar además el error de focal de la cámara 5.

En aplicación de este principio, en la figura 5 se ilustran las etapas de un procedimiento en el cual el vector de estado del filtro de Kalman comprende no solamente los errores de factor de escala y de deriva de los girómetros primarios, sino igualmente los errores de factor de escala y de deriva del girómetro secundario.

El procedimiento según este segundo modo de realización difiere del ilustrado en la figura 4 en las etapas suplementarias siguientes.

En una etapa 203, el módulo de tratamiento corrige la medición de velocidad secundaria Rhp facilitada por el girómetro secundario con la ayuda de errores de factor de escala y de deriva relativos al girómetro secundario que han sido previamente estimados por el filtro de hibridación. El resultado de esta etapa de corrección es una velocidad de rotación secundaria corregida.

El desvío δ calculado en la etapa 204 por el módulo de tratamiento es el desvío entre la velocidad de rotación secundaria corregida y la velocidad de rotación secundaria redundante.

5 En otras palabras, la velocidad de rotación medida por el girómetro secundario 4 utilizada en el primer modo de realización ilustrado en la figura 4 para calcular el desvío δ es reemplazada en el segundo modo de realización ilustrado en la figura 5 por la velocidad de rotación secundaria corregida.

10 Similarmente, en una etapa 205, el módulo de tratamiento 6 corrige la medición de velocidad de rotación R_{vi} (la cual comprende, se recuerda, 3 componentes de las cuales una componente de rotación alrededor del eje óptico) obtenida por la cámara 5, con la ayuda de los errores suscitados por la cámara 5 (por ejemplo un error de focal de la cámara 5) que previamente han sido estimados 200 por el filtro de hibridación. El resultado de esta etapa de corrección es una velocidad de rotación de cámara corregida.

El desvío ϵ calculado por el módulo de tratamiento en la etapa 206 es el desvío entre la velocidad de rotación corregida y la velocidad de rotación secundaria redundante.

15 En otras palabras, la velocidad de rotación de la cámara, utilizada en el primer modo de realización ilustrado en la figura 4 para calcular el desvío ϵ , es reemplazada en el segundo modo de realización ilustrado en la figura 5 por una velocidad de rotación de cámara corregida.

En un tercer modo de realización ilustrado en la figura 6, se pone en práctica un tratamiento suplementario 213 entre las etapas de corrección 102 de los errores de factor de escala y de deriva que contaminan las mediciones de velocidad de rotación primarias, y la etapa de integración 214.

20 Este tratamiento suplementario 213 es una recomposición de un triedro inercial a partir de la velocidad de rotación secundaria corregida a través de la etapa de corrección 212.

Este triedro inercial está compuesto del eje secundario y de otros dos ejes ortogonales con el eje secundario.

El tratamiento de recomposición 213 produce un vector de tres velocidades de rotación R_{hpbc} , que son objeto de la integración 214 en lugar de las velocidades de rotación primarias R_{bc} corregidas para obtener los datos de actitud c, t, r .

25 De esta manera, las cualidades del eje secundario G_{hp} son explotadas directamente en la integración de actitud 214 y se mejora así la precisión de la solución de actitud obtenida, sobre todo en las trayectorias para las cuales es mayoritariamente excitado este eje.

30 La tabla que sigue recapitula las ventajas e inconvenientes de los diferentes elementos del dispositivo de mantenimiento de actitud según la invención, y cómo estos elementos entran en sinergia uno con otro cuando los mismos son combinados de acuerdo con la invención.

Cada elemento del dispositivo de mantenimiento de actitud es así más o menos eficiente en lo que concierne a:

- su capacidad para producir datos poco contaminados de errores de factor de escala;
 - su capacidad para producir datos poco contaminados de errores de deriva;
 - su disponibilidad, es decir su capacidad para producir datos en continuo (disponibilidad elevada) o solamente por intermitencias (disponibilidad baja).
- 35

Esta tabla muestra que la combinación de los girómetros primarios, del girómetro secundario y de la cámara ofrece una protección eficaz contra los errores de factor de escala y de deriva, al tiempo que es apta para facilitar estimaciones de actitud en continuo.

	¿Protección contra errores de factor de escala?	¿Protección contra errores de deriva?	¿Disponibilidad?
Girómetros primarios (3 ejes)	Pequeña	Pequeña	Elevada
Girómetro secundario (1 eje)	Elevada	Elevada	Elevada

ES 2 799 704 T3

Cámara (3 ejes)	Pequeña	Elevada en 2 ejes Pequeña en 1 eje	Pequeña
Cámara + Girómetro secundario	Elevada	Elevada en 2 ejes Pequeña en 1 eje	Pequeña
Girómetros primarios + Girómetro secundario (« diacubo »)	Elevada	Elevada en 1 eje Pequeña en 2 ejes	Elevada
Cámara + girómetros primarios + girómetro secundario	Elevada	Elevada	Elevada

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de mantenimiento de actitud de un portador, comprendiendo el dispositivo:
- tres girómetros primarios (1, 2, 3) dispuestos para medir velocidades de rotación primarias (Rbc) de un portador alrededor de tres ejes primarios,
- 5
- un girómetro secundario (4) dispuesto para medir una velocidad de rotación secundaria (Rhp) del portador alrededor de un eje secundario diferente de cada uno de los ejes primarios,
 - una cámara (5) que presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios,
 - un módulo de tratamiento de datos (6) configurado para
- 10
- estimar errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias (Rbc), con la ayuda de datos de la velocidad de rotación secundaria (Rhp) y de imágenes adquiridas por la cámara (5), y
 - corregir las velocidades de rotación primarias con los citados errores estimados,
- estando caracterizado el dispositivo por que el girómetro secundario (4) es de un tipo adaptado para suscitar errores de factor de escala y/o errores de deriva en la velocidad de rotación secundaria que son inferiores a los suscitados por los girómetros primarios (1, 2, 3) en las velocidades de rotación primarias.
- 15
2. Dispositivo según la reivindicación precedente, en el cual el módulo de tratamiento de datos (6) comprende un filtro de hibridación, tal como un filtro de Kalman, configurado para estimar los errores de factor de escala y de deriva a partir de los datos de la velocidad de rotación secundaria (Rhp) y de imágenes adquiridas por la cámara (5).
3. Dispositivo según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual el eje óptico de la cámara es paralelo al eje secundario.
- 20
4. Dispositivo según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual el girómetro secundario (4) es del tipo semiesférico vibratorio.
5. Dispositivo según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual los girómetros primarios (1, 2, 3) son de tipo MEMS.
- 25
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones precedentes, en el cual los tres ejes primarios son ortogonales dos a dos, y el eje secundario forma un ángulo de $54,7^\circ$ grados con cada eje primario.
7. Procedimiento de mantenimiento de actitud de un portador, que comprende las etapas de:
- medición (100) de tres velocidades de rotación del portador alrededor de tres ejes primarios secantes dos a dos, con la ayuda de tres girómetros primarios,
- 30
- medición (102) de una velocidad de rotación alrededor de un eje secundario secante con cada uno de los ejes primarios, con la ayuda de un girómetro secundario,
 - adquisición (104) de imágenes con la ayuda de una cámara que presenta un eje óptico diferente de cada uno de los ejes primarios,
- 35
- estimación (200) de errores de factor de escala y de deriva que contaminan las velocidades de rotación primarias, con la ayuda de datos de la velocidad de rotación secundaria y de las imágenes adquiridas por la cámara,
 - corrección (202) de las velocidades de rotación primarias con la ayuda de los citados errores estimados,
- estando caracterizado el procedimiento por que el girómetro secundario (4) es elegido de un tipo adaptado para suscitar errores de factor de escala y/o errores de deriva en la velocidad de rotación secundaria que son inferiores a los suscitados por los girómetros primarios (1, 2, 3) en las velocidades de rotación primarias.
- 40
8. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el cual la estimación (200) de los errores de factor de escala y de deriva es puesta en práctica por un filtro de hibridación, tal como un filtro de Kalman, por medio de datos de observación que dependen de un desvío δ entre:
- una velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación secundaria, y
- 45
- una velocidad de rotación del portador alrededor del eje secundario deducida de las velocidades de rotación primarias.

9. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el cual la velocidad de rotación que depende de la velocidad de rotación secundaria es una velocidad resultante de una corrección (203) de la velocidad de rotación secundaria por medio de errores suscitadas por el girómetro secundario previamente estimados (200) por el filtro de hibridación.

5 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 9, que comprende la estimación de una velocidad de rotación, denominada velocidad de rotación de cámara, y que es obtenida por análisis (106) de las imágenes adquiridas por la cámara (5), dependiendo la corrección de los errores de factor de escala y de deriva de esta velocidad de rotación de cámara estimada.

11. Procedimiento según la reivindicación precedente, en el cual la estimación (200) de los errores de factor de escala y de deriva es puesta en práctica por medio de datos de observación que dependen de un desvío ε entre:

- 10
- una velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación de la cámara, y
 - una velocidad de rotación del portador vista por la cámara (5) que se deduce (202) de las velocidades de rotación primarias.

12. Procedimiento según la reivindicación precedente, que comprende además las etapas de:

- 15
- estimación (200) de un error de focal suscitado por la cámara (5),
 - corrección (205), con la ayuda del error de focal, de la velocidad de rotación de la cámara obtenida por análisis de las imágenes adquiridas por la cámara, de modo que se produzca una velocidad de rotación de la cámara corregida,

y en el cual la velocidad de rotación dependiente de la velocidad de rotación de la cámara estimada utilizada para calcular el desvío ε es la velocidad de rotación de cámara corregida.

20 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 12, que comprende además las etapas de:

- cálculo de un índice de confianza sobre la medición de un flujo óptico en las imágenes adquiridas por la cámara (5)
- comparación del índice con un umbral predeterminado,

25 siendo puesta en práctica o no la etapa de corrección (202) de las velocidades de rotación primarias en función del resultado de esta comparación.

14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 13, en el cual las velocidades de rotación primarias Rbc son corregidas (212) por aplicación de la fórmula siguiente:

$$\begin{bmatrix} \text{febc1} & 0 & 0 \\ 0 & \text{febc2} & 0 \\ 0 & 0 & \text{febc3} \end{bmatrix} \cdot \text{Rbc} - \begin{bmatrix} \text{dbc1} \\ \text{dbc2} \\ \text{dbc3} \end{bmatrix}$$

donde febc1, febc2, febc3 son los errores de factor de escala y dbc1, dbc2 y dbc3 son los errores de deriva.

30 15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 14, que comprende además una etapa de integración (214) que produce datos de actitud del portador a partir de las velocidades de rotación primarias corregidas.

16. Procedimiento según la reivindicación precedente en su combinación con la reivindicación 9, que comprende además el cálculo (213) de tres velocidades de rotación denominadas recompuestas a partir de:

- 35
- las velocidades de rotación primarias corregidas con la ayuda de los errores de factor de escala y de deriva estimados,
 - la velocidad resultante de la corrección de la velocidad de rotación secundaria,

en el cual una de las velocidades de rotación recompuestas es una velocidad de rotación alrededor del eje secundario, y en el cual los datos de actitud del portador son producidos por integración de las velocidades de rotación recompuestas.

40 17. Procedimiento según una de las reivindicaciones 15 y 16, que comprende además las etapas de:

- estimación (200) de errores de actitud del portador
- corrección (216) de los datos de actitud producidos por medio de los errores de actitud estimados.

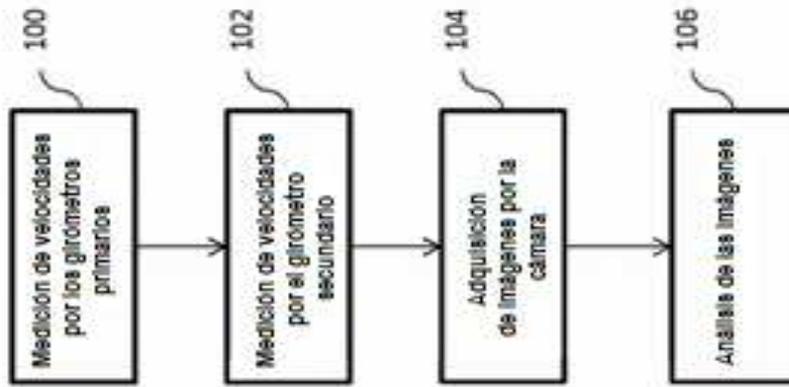


FIG. 3

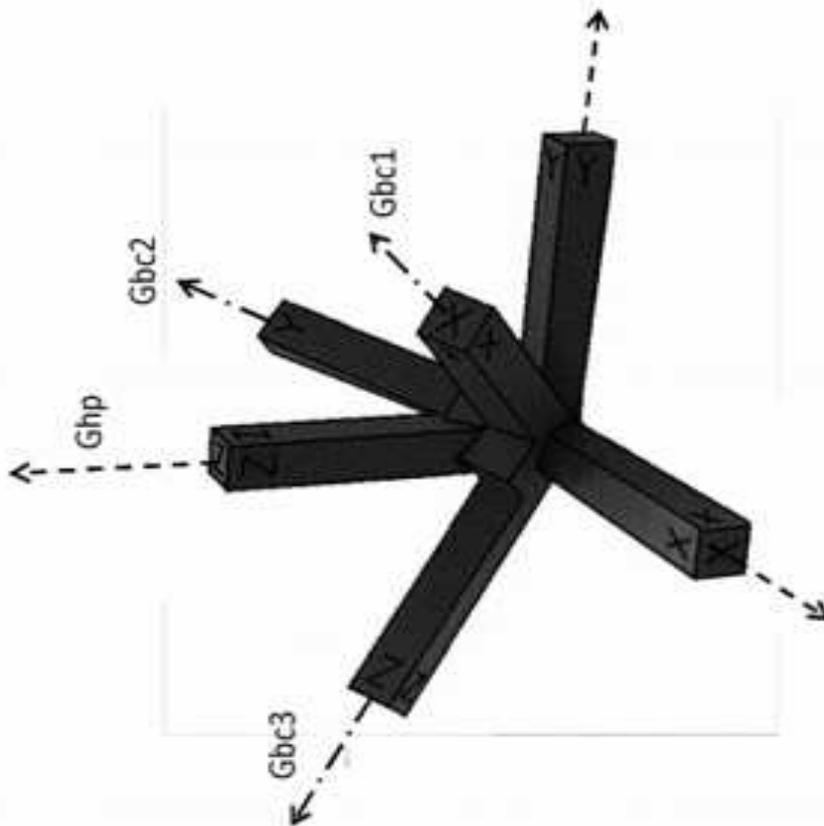


FIG. 2

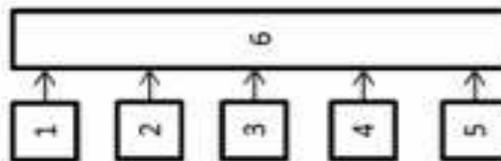


FIG. 1

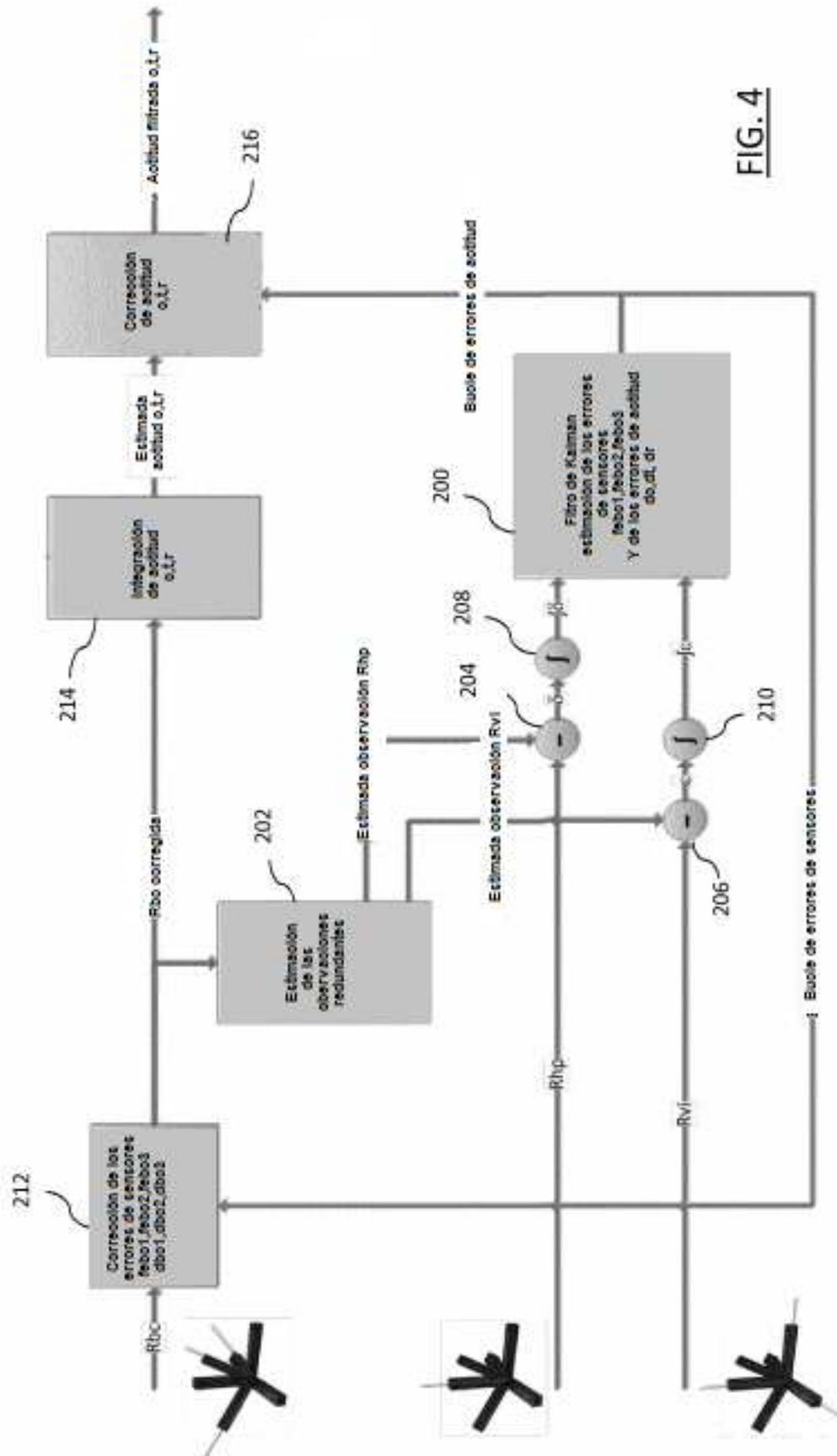


FIG. 4

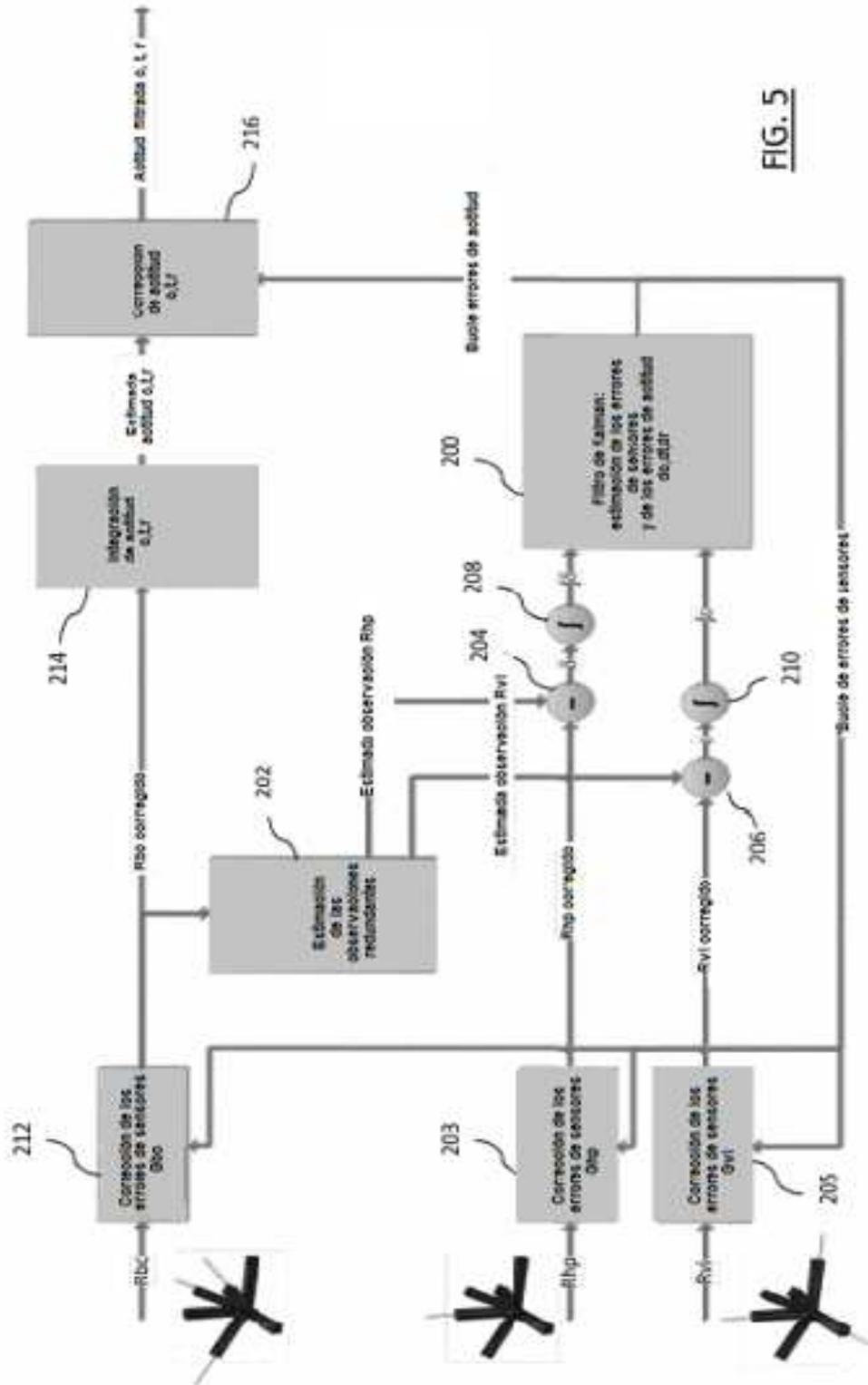


FIG. 5

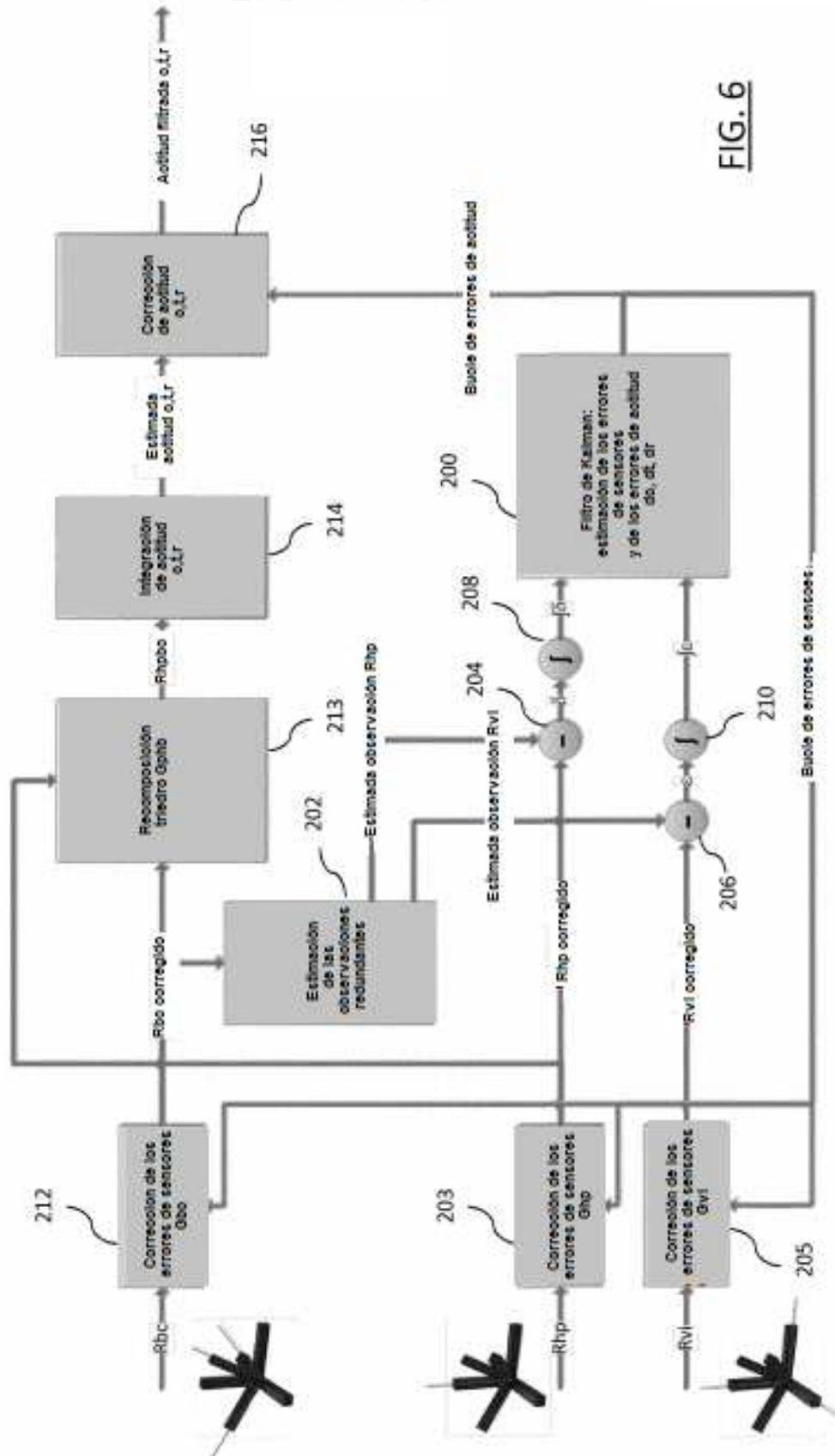


FIG. 6