

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 983 528**

51 Int. Cl.:

G01C 17/38 (2006.01)

G01C 21/20 (2006.01)

G01C 21/08 (2006.01)

G01C 21/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.07.2018 PCT/FR2018/051940**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.01.2019 WO19020961**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.07.2018 E 18765691 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.06.2024 EP 3658853**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para caracterizar un rumbo determinado a partir de la medición del campo magnético**

30 Prioridad:
28.07.2017 FR 1757220

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.10.2024

73 Titular/es:
**SYSNAV (100.0%)
72 rue Emile Loubet
27200 Vernon, FR**

72 Inventor/es:
**VISSIERE, DAVID;
HILLION, MATHIEU;
CHESNEAU, CHARLES-IVAN y
DUGARD, JEAN-PHILIPPE**

74 Agente/Representante:
GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 983 528 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para caracterizar un rumbo determinado a partir de la medición del campo magnético

Campo técnico general y estado de la técnica

La presente invención se refiere en general a técnicas magnetoinerciales.

5 Más concretamente, se refiere a la determinación del rumbo mediante magnetómetros.

Es especialmente útil para mediciones en entornos urbanos o interiores, es decir, en el interior de edificios.

Los magnetómetros se utilizan tradicionalmente para calcular el rumbo en los sistemas embarcados.

10 En este caso, se supone que el campo magnético medido por el sensor es el campo magnético terrestre, cuya componente horizontal apunta hacia el norte magnético. La diferencia entre la dirección del norte magnético y el norte verdadero (conocida como declinación magnética) se conoce y se tabula. Sin pérdida de generalidad, se asumirá en lo que sigue que el norte magnético y el norte verdadero son uno y el mismo, y que los magnetómetros indican por tanto lo que llamaremos norte.

Normalmente, los procedimientos de determinación utilizados para calcular el rumbo a partir de mediciones magnetométricas se basan en:

- 15
- un modelo que relaciona la medición proporcionada por el magnetómetro y la información sobre el rumbo del sistema,
 - una caracterización de la pertinencia de esta relación para las mediciones efectuadas.

20 En un enfoque clásico, el cálculo utilizado puede ser un filtrado de tipo Kalman con el campo magnético como medida, lo que permite reajustar el rumbo contenido en el estado, con un ruido de medida que depende de la caracterización de la pertinencia.

El modelo consiste en escribir que el campo magnético medido M contiene información de rumbo, por ejemplo mediante la ecuación

$$M = R(\psi, \theta, \phi)^T M_{\text{TERRESTRE}}$$

25 donde R es la matriz de rotación utilizada para pasar del sistema de referencia del objeto al sistema de referencia inercial terrestre, ψ, θ, ϕ los ángulos de Euler y $M_{\text{TERRESTRE}}$ el campo magnético terrestre.

La pertinencia de esta ecuación se caracteriza por una varianza de medida, es decir, se supone que el error de esta igualdad es una variable aleatoria gaussiana con expectativa cero.

Esta varianza se utiliza para calcular automáticamente la ganancia de Kalman que pondera el reajuste para tener en cuenta los diferentes ruidos (ruidos dinámicos vinculados al entorno exterior y ruidos de medición del magnetómetro).

30 En otro enfoque, se implementa un cálculo de filtrado lineal utilizando el mismo tipo de modelado y caracterización.

En este enfoque, es el ajuste relativo de la amplitud de ganancia de la ecuación lo que caracteriza su pertinencia. En general, esta ganancia se ajusta a mano. El experto en la materia podrá entonces ponderarlo en función de la pertinencia de la modelización.

35 En estos dos enfoques, los parámetros que caracterizan la pertinencia del modelo (varianza del ruido gaussiano en el caso del filtro de Kalman, ganancia en el caso del filtrado lineal) son generalmente parámetros constantes, independientes del campo magnético medido.

Recientemente se ha propuesto, por ejemplo en las publicaciones

- 40
- W. T. Faulkner, R. Alwood, W. T. David y J. Bohlin, "Gps-denied pedestrian tracking in indoor environments using an imu and magnetic compass", en Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, (San Diego, CA), pp. 198 - 204, enero de 2010.
 - M. H. Afzal, V. Renaudin, and G. Lachapelle, "Magnetic field based heading estimation for pedestrian navigation environments," in 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, (Guimaraes, Portugal), Sep 2011.

45 las caracterizaciones de la pertinencia de la modelización, teniendo en cuenta el campo magnético medido. La publicación M. H. Afzal, V. Renaudin, G. Lachapelle, "Assessment of indoor magnetic field anomalies using multiple magnetometers", Proceedings of the 23rd international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation, The institute of navigation, páginas 525-533 (2010) divulga la determinación del rumbo magnético en la

que las perturbaciones del campo magnético se identifican utilizando gradientes de campo magnético que deben eliminarse de la caracterización del rumbo.

Sin embargo, las caracterizaciones realizadas de este modo no son plenamente satisfactorias.

5 Este es particularmente el caso en entornos en los que el campo magnético está fuertemente perturbado, como los entornos interiores o urbanos, en los que las perturbaciones magnéticas de las corrientes eléctricas o de los elementos metálicos de los edificios se superponen al campo magnético terrestre.

Presentación general de la invención

Un objetivo general de la invención es proponer una solución que permita caracterizar mejor la pertinencia de la modelización utilizada, en particular en entornos muy perturbados.

10 En particular, la invención propone un procedimiento de determinación del rumbo, en el que se mide un campo magnético mediante al menos un magnetómetro y se determina un rumbo magnético a partir de dicha medición y en el que unos medios de cálculo implementan un procedimiento que calcula, para cada medición del rumbo magnético, un valor de caracterización del rumbo así determinado, caracterizado porque dicho valor de caracterización es función del gradiente del campo magnético medido, utilizándose dicho valor en la determinación del rumbo.

15 En particular, dicho valor de caracterización es una función monótona, preferentemente creciente o incluso estrictamente creciente (se tomará el ejemplo de una función lineal con coeficiente directamente positivo), de una norma de gradiente, en particular la norma L2.

20 Se entiende que dicho valor de caracterización podría ser una función decreciente de la norma del gradiente si, por ejemplo, se decide arbitrariamente que el valor de caracterización debe tener valores cada vez más bajos a medida que el rumbo está cada vez más perturbado.

Para un instante de muestreo dado, los medios de cálculo determinan:

- una estimación de una predicción de rumbo que es función del rumbo determinado en el instante de muestreo anterior,
- un reajuste del rumbo previsto así estimado en función de un rumbo magnético determinado a partir de las mediciones del magnetómetro,

y en el que el reajuste se determina en función de dicho valor de caracterización, y ventajosamente es siempre una función monótona (en particular creciente) del valor de caracterización.

30 Ventajosamente, por lo tanto, dicho reajuste es una función del gradiente del campo magnético medido, y en particular una función monotónica (por composición de funciones monotónicas) de la norma del gradiente. Esto tiene en cuenta el hecho de que cuanto más perturbado esté el entorno, mayor será el gradiente y, por tanto, más distorsionada estará la medición del rumbo.

En un modo de realización preferido, los medios de cálculo estiman la amplitud del reajuste en función de:

- un modelo de la evolución de las perturbaciones magnéticas entre dos instantes de muestreo y
- una estimación a priori de la amplitud de las perturbaciones.

De este modo, el procesamiento tiene en cuenta la evolución de la perturbación del rumbo magnético entre dos instantes de muestreo y tiene en cuenta cualquier correlación espacial de la perturbación debida al entorno en el caso de instantes de muestreo sucesivos.

El cálculo resultante de la es más fiable que en la técnica anterior.

40 En particular, para un instante de muestreo k +1 dado, los medios de cálculo estiman una perturbación de rumbo relacionada calculando

$$\psi^{(d)}[k + 1] = \alpha[k](\psi^{(d)}[k] + \hat{u}[k]) + (1 - \alpha[k])\frac{\hat{u}[k]}{2} + v_{\psi^{(d)}}[k]$$

donde

$$\alpha[k] = 1 - \frac{\sigma_u[k]^2}{2\alpha[k]^2}$$

45 y $v_{\psi^{(d)}}$ es una variable aleatoria gaussiana de varianza

$$a[k]^2(1 - \alpha[k]^2)$$

- k es el instante de muestreo anterior,
- $a[k]$ es un parámetro que representa la amplitud a priori de la perturbación magnética,
- siendo \hat{u} y σ_u dos parámetros calculados por los medios computacionales como estimación de la expectativa y la varianza de la evolución de la perturbación.

Ventajosamente, los medios de cálculo estiman el parámetro $a[k]$ como una función lineal de la norma del gradiente del campo magnético.

El parámetro $\hat{u}[k]$, por ejemplo, es calculado por los medios de cálculo como la diferencia entre los rumbos magnéticos determinados directamente a partir de las salidas del magnetómetro para los instantes $k+1$ y k , a la que se resta el cambio de rumbo previsto ($\omega[k]dt$).

El parámetro σ_u puede estimarse en función de la velocidad de desplazamiento o del desplazamiento entre dos instantes de muestreo sucesivos.

Por ejemplo, el procesamiento implementa el filtrado de Kalman, cuyo estado tiene como al menos un parámetro el rumbo real y la perturbación del rumbo magnético ($\psi, \psi^{(d)}$)

La predicción del rumbo puede determinarse en función de las mediciones de uno o más sensores de una unidad inercial.

La invención también se refiere a un dispositivo para determinar el rumbo mediante sensores magnéticos, que comprende magnetómetros y medios de cálculo para calcular el rumbo a partir del campo magnético medido por dichos magnetómetros, caracterizado porque los medios de cálculo implementan el procesamiento mencionado para diferentes instantes sucesivos de muestreo.

También propone un sistema de navegación magneto-inercial que comprende al menos uno de estos dispositivos de medición del rumbo.

Resulta ventajoso utilizar un sistema de este tipo en un entorno urbano o en el interior de edificios.

La invención también se refiere a:

- un producto de programa de ordenador que comprende instrucciones de código para ejecutar un procedimiento del tipo anterior, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador;
- un medio de almacenamiento legible por un equipo informático en el que un producto de programa informático incluye instrucciones de código para ejecutar dicho procedimiento.

Presentación de las figuras

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán de la siguiente descripción, que es puramente ilustrativa y no limitativa, y debe leerse junto con las figuras adjuntas, en las que:

- la figura 1 es un diagrama del equipo para la implementación del procedimiento según la invención;
- la figura 2 muestra con más detalle un ejemplo de caja para la implementación del procedimiento según la invención;
- la figura 3 ilustra las principales etapas de un procedimiento según un modo de implementación de la invención.

Descripción de uno o varios modos de implementación y realización

Generalidades - Dispositivo de medición

Con referencia a la figura 1, el dispositivo de medida propuesto se utiliza, por ejemplo, para estimar el movimiento de un objeto 1 que se desplaza en un campo magnético ambiente (típicamente el campo magnético terrestre, eventualmente ligeramente alterado por objetos metálicos cercanos), denotado B . Como sabemos, el campo magnético es un campo vectorial tridimensional, es decir, que asocia un vector de dimensión tres a cada punto tridimensional en el que se mueve el objeto.

Este objeto 1 puede ser cualquier objeto móvil cuya posición deba conocerse, por ejemplo un vehículo con ruedas, un dron, etc., pero también un peatón.

El objeto 1 comprende en una caja 2 (soporte) una pluralidad de sensores de medición magnética 20, es decir, magnetómetros axiales 20. Por magnetómetro axial se entiende un elemento capaz de medir una componente de dicho campo magnético, es decir, la proyección de dicho vector de campo magnético B en dicho magnetómetro 20 a lo largo de su eje.

Más concretamente, los magnetómetros 20 son parte integrante de la caja 2. Su movimiento es sustancialmente idéntico al de la caja 2 y el objeto 1 en el sistema de referencia terrestre.

Preferiblemente, el marco de referencia del objeto 1 está provisto de un marco de referencia cartesiano ortonormal en el que los magnetómetros 20 tienen una posición predeterminada en este marco de referencia.

5 En la figura 2, la caja 2 está fijada al objeto 1 (por ejemplo, la extremidad de un peatón) por medios de fijación 23. Estos medios de sujeción (23) consisten, por ejemplo, en una muñequera con un cierre autoadherente que agarra el miembro y permite sujetarlo firmemente.

10 Por supuesto, la invención no se limita a estimar el movimiento de un peatón, pero es particularmente ventajosa en tal uso porque ocupa muy poco espacio, lo que es necesario para que la caja sea ergonómicamente transportable por un humano.

15 La caja 2 puede incluir medios de cálculo 21 (típicamente un procesador) para implementar directamente el procesamiento del presente procedimiento en tiempo real, o las mediciones pueden enviarse a través de medios de comunicación 25 a un dispositivo externo, como un terminal móvil (smartphone) 3, o incluso un servidor remoto 4, o las mediciones pueden registrarse en medios locales de almacenamiento de datos 22 (una memoria del tipo flash, por ejemplo), memoria local para su posterior procesamiento, por ejemplo en el servidor 4.

20 Los medios de comunicación 25 pueden implementar comunicación inalámbrica de corto alcance, por ejemplo Bluetooth o Wifi (en particular en una realización con un terminal móvil 3), o pueden ser medios de conexión a una red móvil (típicamente UMTS/LTE) para comunicación de larga distancia. Cabe señalar que los medios de comunicación 25 pueden ser, por ejemplo, una conexión por cable (típicamente USB) para transferir datos desde los medios locales de almacenamiento de datos 22 a los de un terminal móvil 3 o un servidor 4.

25 Si es un terminal móvil 3 (o un servidor 4) el que alberga la "inteligencia", comprende medios de cálculo 31 (o 41) tales como un procesador para implementar los procesamientos del presente procedimiento que se describirán. Cuando los medios de cálculo utilizados son los 21 de la caja 2, ésta puede incluir también medios de comunicación 25 para transmitir la posición estimada. Por ejemplo, la posición del usuario puede enviarse al terminal móvil 3 para mostrar la posición en una interfaz de software de navegación.

Los medios de cálculo de datos 21, 31, 41 de la caja 2, de un smartphone 3 y de un servidor remoto 4, respectivamente, pueden llevar a cabo todos o algunos de las etapas del procedimiento, dependiendo de la aplicación.

A tal fin, cada uno de ellos comprende medios de almacenamiento en los que se almacenan todas o algunas de las secuencias de instrucciones de código para ejecutar el procedimiento.

30 Predicción y reajuste

Los medios de cálculo implementan (Figura 3) un filtrado 100 que calcula, por una parte, una estimación del valor del rumbo por predicción (etapa 101) y, por otra parte, implementa un reajuste en función de una estimación del error (etapa 102).

35 En particular, conociendo la velocidad angular ω dada por ejemplo por un girómetro, la etapa 101 calcula el rumbo ψ_{k+1} en un instante $k+1$ como igual a

$$\psi_{k+1} = \psi_k + \omega \cdot \Delta t$$

donde ψ_k es el rumbo en el instante k anterior y donde Δt es el tiempo que separa estos dos instantes de muestreo.

El reajuste 102 tiene en cuenta las mediciones efectuadas por los magnetómetros 20.

40 A continuación, la medición del rumbo magnético (derivada de las mediciones del magnetómetro) para un instante k dado se denota $z_\psi[k]$, con

$$z_\psi[k] = \psi_k$$

Típicamente, el rumbo magnético viene dado por

$$z_\psi[k] = \text{atan} \left(\frac{My[k]}{Mx[k]} \right)$$

45 donde My y Mx son dos componentes horizontales del campo magnético en un sistema de referencia terrestre, calculándose estas dos componentes en función de la actitud determinada para el objeto 1 por una unidad inercial del mismo.

El medio de cálculo calcula el rumbo de reajuste $\psi_{k+1}^{\text{reajuste}}$ correspondiente al instante k+1 como igual a la suma del rumbo estimado ψ_{k+1} en este instante y un reajuste que ventajosamente es función de

- una ganancia K_k calculada o ajustada con respecto al instante k anterior
- una estimación del error $Err(\psi_{k+1}, z_\psi)$ entre el rumbo previsto ψ_{k+1} y la medición z_ψ

5 De este modo, los medios de cálculo utilizan el rumbo magnético obtenido a partir de la medición efectuada por los magnetómetros para reajustar el estado, y en particular el rumbo, calculando

$$\psi_{k+1}^{\text{reajuste}} = \psi_{k+1} + K_k \cdot Err(\psi_{k+1}, z_\psi)$$

Típicamente, el error $Err(\psi_{k+1}, z_\psi)$ puede ser una simple diferencia entre el rumbo predicho, estimado en el instante k+1 (antes del reajuste), y el rumbo magnético z_ψ obtenido de las mediciones del magnetómetro.

10 Sin embargo, son posibles otras funciones de error, en particular en el caso del filtrado no lineal.

En particular, el reajuste $K_k \cdot Err(\psi_{k+1}, z_\psi)$, y más particularmente la ganancia K_k , pueden ventajosamente depender del gradiente del campo magnético medido por los magnetómetros 20. Como se ha explicado anteriormente, la ganancia K_k es preferentemente una función monótona, en particular creciente, de una norma de gradiente.

15 De este modo, la corrección de reajuste es tanto más importante cuanto que el campo magnético varía mucho y, por tanto, es probable que induzca errores significativos en la medición del rumbo.

El valor de rumbo recalculado así obtenido es almacenado por dichos medios de cálculo 21, 31, 41 y/o utilizado por dichos medios para su posterior procesamiento y para calcular información de navegación magneto-inercial (velocidad lineal, velocidad angular, posición, rumbo, etc.).

20 También puede ser transmitido por los medios de cálculo a los medios de interfaz, por ejemplo en el teléfono, para que pueda visualizarse en la pantalla del teléfono.

Modelo de evolución de las perturbaciones medioambientales

El siguiente es un ejemplo de un posible cálculo del reajuste en el que la medición del rumbo magnético z_ψ se corrige mediante una estimación de la perturbación del campo magnético debida al entorno.

25 El rumbo magnético z_ψ obtenido a partir de mediciones magnetométricas puede considerarse desglosado de la siguiente manera:

$$z_\psi = \psi + \psi^{(d)} + v_{z_\psi}$$

donde:

- ψ corresponde al rumbo real que intentamos determinar,
- v_{z_ψ} corresponde a un error de medición gaussiano y
- $\psi^{(d)}$ ("d" de "disturbance" en inglés) corresponde a una perturbación del rumbo magnético vinculada al entorno (típicamente, perturbaciones vinculadas a infraestructuras metálicas y cables eléctricos en entornos urbanos o en edificios).

35 La perturbación del rumbo magnético relacionada con el entorno está altamente correlacionada espacialmente. El campo magnético vinculado a las perturbaciones ambientales es, de hecho, un campo vectorial continuo y los campos magnéticos en dos puntos A y B dados son tanto más cercanos cuanto más próximos están en el espacio.

En una realización, la perturbación de rumbo $\psi^{(d)}$ relacionada con el entorno es estimada por los medios de cálculo mediante una formulación que tiene en cuenta las correlaciones de evolución que pueden esperarse para las perturbaciones del campo magnético entre dos instantes de muestreo sucesivos (correlación temporal, espacial o más compleja).

40 Esta estimación se construye para permitir un modelo de Markov (que puede utilizarse en un filtro recursivo) para la evolución de ψ_d y

- permite tener en cuenta un modelo de evolución de la perturbación del rumbo magnético (correlación temporal, espacial o más compleja)
- permite construir un modelo de filtro para el que el rumbo es observable (de lo contrario, se pierde toda esperanza de construir un estimador del rumbo)

En la estimación propuesta, la amplitud del reajuste se estima como una función de un modelo de la evolución de las perturbaciones magnéticas entre dos instantes de muestreo y una estimación a priori de la amplitud de la perturbación.

Los inventores han encontrado (y verificado matemáticamente) que en el caso de una correlación espacial (caso de perturbaciones en un entorno urbano o "indoor"), una estimación adecuada de la evolución de la perturbación $\psi^{(d)}$ entre dos instantes de muestreo separados por un paso de tiempo ventajosamente como sigue:

$$\psi^{(d)}[k + 1] = \alpha[k](\psi^{(d)}[k] + \hat{u}[k]) + (1 - \alpha[k])\frac{\hat{u}[k]}{2} + v_{\psi^{(d)}}[k]$$

donde

$$\alpha[k] = 1 - \frac{\sigma_u[k]^2}{2a[k]^2}$$

y $v_{\psi^{(d)}}$ es una variable aleatoria gaussiana con varianza

$$a[k]^2(1 - \alpha[k]^2)$$

- $a[k]$ es un parámetro que representa la amplitud a priori de la perturbación magnética,
- siendo \hat{u} y σ_u la esperanza y la varianza de una variable aleatoria que es un modelo (en forma de variable aleatoria gaussiana) de la variación de la perturbación del rumbo magnético entre 2 instantes de muestreo. es una estimación que tiene en cuenta el ruido del magnetómetro.

Esta estimación se resta de z_{ψ} para calcular el error, que puede calcularse directamente entre ψ_{k+1} y $(z_{\psi} - \psi^{(d)}[k + 1])$, o confiarse a un filtro de tipo Kalman que tenga tanto $\psi^{(d)}$ como ψ en su estado.

Determinación del parámetro $a[k]$

El parámetro $a[k]$ representa la amplitud a priori de la perturbación del rumbo magnético. Caracteriza el rumbo y se calcula, por ejemplo, como una función lineal de una norma del gradiente del campo magnético, que es un ejemplo de función monótonica.

Por ejemplo,

$$a[k] = a_0 + a_1 N[k]$$

con $N[k] = \|\widehat{\nabla B}[k]\|$, es decir, la norma L2. No obstante, pueden utilizarse otras normas, como la norma L1, la norma Frobenius o cualquier otra norma.

Siendo a_0 y a_1 dos parámetros fijados previamente antes de aplicar el procedimiento de filtrado, siendo $B[k]$ el campo magnético en el momento k . La función $a[k]$ es creciente siempre que a_1 sea positiva.

Alternativamente, sin embargo, pueden utilizarse otras funciones monótonas, por ejemplo una función cuadrática con parámetros elegidos adecuadamente entre los componentes del gradiente.

De este modo, como se ha indicado anteriormente, el término de reajuste $K_k.Err(\psi_{k+1}, z_{\psi})$ es una función monótonica de la ganancia K_k , a su vez función monótonica de la norma del gradiente de campo magnético medido por los magnetómetros 20, lo que permite una corrección eficaz.

Otros procedimientos son posibles para determinar el parámetro $a[k]$.

En particular, $a[k]$ también puede determinarse por comparación con un modelo del campo magnético terrestre, por ejemplo utilizando las técnicas propuestas en la publicación:

" Assessment of Indoor Magnetic Field Anomalies using Multiple Magnetometers Assessment of indoor" - M.H. Afzal, V. Renaudin, G. Lachapelle - Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010) 21 - 24 de septiembre de 2010.

Las soluciones en las que el parámetro $a[k]$ es una función del gradiente del campo magnético, sin embargo, proporcionan mejores correcciones y no requieren modelos del campo magnético terrestre.

Determinación del parámetro \hat{u}

El término $v_{\psi^{(d)}}$ puede considerarse despreciable como primera aproximación y tratarse como cero en el cálculo.

El parámetro $\hat{u}[k]$ representa el valor más probable para la evolución de la perturbación.

Este parámetro se calcula, por ejemplo, utilizando girómetros que se suponen buenos a corto plazo. La evolución más probable de la perturbación viene dada entonces por la diferencia entre la evolución de la medición del rumbo magnético y la evolución del rumbo giroscópico:

$$\begin{aligned}
 a[k] &= E \left[\psi^{(a)}[k+1] - \psi^{(a)}[k] \right] \\
 &= E \left[\underbrace{\frac{\psi^{(a)}[k+1] + \psi[k+1]}{z_\psi[k+1]}}_{\text{rumbo magnético medido en el instante } k+1} - \underbrace{\frac{(\psi^{(a)}[k] + \psi[k])}{z_\psi[k]}}_{\text{rumbo magnético medido en el instante } k} - \underbrace{(\psi[k+1] - \psi[k])}_{\text{evolución rumbo}} \right] \\
 &= \dots
 \end{aligned}$$

5 donde: E[.] es la expectativa matemática, $\omega[k]$ es la velocidad de rotación giroscópica y dt es la etapa de muestreo.

Así, el parámetro $\hat{u}[k]$ es calculado por los medios de cálculo como la diferencia entre los rumbos magnéticos determinados directamente a partir de las salidas del magnetómetro para los instantes $k+1$ y k , a la que se resta la rotación prevista $\omega[k]dt$.

Determinación del parámetro σ_u

10 El parámetro σ_u representa la imagen de la correlación entre la perturbación en la etapa k y la de la etapa $k+1$.

Ventajosamente, puede indexarse sobre la velocidad de desplazamiento (o sobre el desplazamiento entre dos instantes de muestreo sucesivos, lo que es similar) para tener en cuenta la correlación espacial de las perturbaciones magnéticas.

Por ejemplo $\sigma_u = c \cdot \|v\|$ donde c es un coeficiente de ajuste.

15 Otros modos de implementación

En otro modo de implementación, se combinan diferentes valores de rumbo magnético para obtener un valor variable dependiente del rumbo que esté lo más libre posible de errores asociados a perturbaciones magnéticas.

La variable a determinar es, por ejemplo, el rumbo medio de un trozo de trayectoria, aunque por supuesto pueden reverse otras variables en función del rumbo.

20 Para ello, los medios de cálculo registran, para cada etapa de muestreo k , el valor del rumbo magnético medido $z_\psi[k]$ y el valor de la caracterización del rumbo magnético llamada $a[k]$, calculada como una función monótonica de una norma de gradiente.

Por ejemplo, $a[k] = a_0 + a_1 \|\nabla B\|$

25 El rumbo $\hat{\psi}_{[k_0, k_1]}$ más probable para el trozo de trayectoria definido entre dos instantes de muestreo $k = k_0$ y $k = k_1$ puede así plantearse en forma de optimización

$$\hat{\psi}_{[k_0, k_1]} = \underset{\hat{\psi}}{\operatorname{argmin}} \sum_k \frac{1}{a[k]} \|z_\psi[k] - \hat{\psi}\|^2$$

donde $\|\cdot\|$ es una norma (L1, L2 u otra).

El algoritmo de optimización implementado por los medios de cálculo puede ser de cualquier tipo adecuado: descenso de gradiente, algoritmo de Levenberg-Marquardt o algoritmo de Metrópolis-Hastings.

30 Además, en el caso de la norma L2, el problema se plantea entonces en forma de mínimos cuadrados y los medios de cálculo determinan directamente

$$\hat{\psi}_{[k_0, k_1]} = \frac{\sum_{k_0}^{k_1} z_\psi[k] / a[k]}{\sum_{k_0}^{k_1} (1/a[k])}$$

35 Es evidente que este valor es mucho más ventajoso que el valor medio no ponderado por el valor de caracterización, ya que los instantes k en los que la perturbación magnética es más fuerte tienen mucho menos impacto en la media ponderada que en la media no ponderada.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación del rumbo, en el que se mide un campo magnético mediante al menos un magnetómetro (20) y se determina un rumbo magnético a partir de dicha medición, y en el que unos medios de cálculo (21, 31, 41) implementan un procesamiento que calcula, para cada medición del rumbo magnético, un valor de caracterización del rumbo así determinado, **caracterizado porque** dicho valor de caracterización es una función monótonica de una norma del gradiente del campo magnético medido, utilizándose dicho valor en la determinación del rumbo.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los medios de cálculo (21, 31, 41) determinan para un instante de muestreo dado

- una estimación de una predicción de rumbo que es función del rumbo determinado en el instante de muestreo anterior,
- un reajuste del rumbo previsto así estimado en función de un rumbo magnético determinado a partir de las mediciones del magnetómetro,

y en el que el reajuste se determina en función de dicho valor de caracterización.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 y 2, en el que los medios de cálculo (21, 31, 41) determinan un valor de una variable dependiente del rumbo en función de una pluralidad de rumbos magnéticos medidos y de valores de caracterización.

4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que, durante dicho reajuste, los medios de cálculo (21, 31, 41) estiman la amplitud del reajuste en función de:

- un modelo de la evolución de las perturbaciones magnéticas entre dos instantes de muestreo y
- una estimación a priori de la amplitud de las perturbaciones.

5. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que, para un instante de muestreo k+1 dado, los medios de cálculo (21, 31, 41) estiman una perturbación de rumbo relacionada calculando

$$\alpha[k](\psi^{(a)}[k] + \hat{u}[k]) + (1 - \alpha[k])\frac{\hat{u}[k]}{2} + v_{\psi^{(a)}}[k]$$

donde

$$\alpha[k] = 1 - \frac{\sigma_u[k]^2}{2\alpha[k]^2}$$

donde $v_{\psi^{(a)}}$ es una variable aleatoria gaussiana de varianza $\alpha[k]^2(1 - \alpha[k]^2)$. Siendo k el instante de muestreo anterior, siendo $a[k]$ un parámetro que representa la amplitud a priori de la perturbación magnética, siendo \hat{u} y σ_u dos parámetros calculados por los medios de cálculo como estimación de la expectativa y la varianza de la evolución de la perturbación.

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que los medios de cálculo (21, 31, 41) estiman el parámetro $a[k]$ como una función lineal de la norma del gradiente del campo magnético.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 y 6, en el que el parámetro $\hat{u}[k]$ se calcula por los medios de cálculo (21, 31, 41) como la diferencia entre los rumbos magnéticos determinados directamente a partir de las salidas del magnetómetro para los instantes k+1 y k, a la que se resta un cambio de rumbo previsto ($\omega[k]dt$) donde $w[k]$ es una velocidad de rotación girométrica y dt es una etapa de muestreo.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 7, en el que el parámetro σ_u se estima en función de la velocidad de desplazamiento o del desplazamiento entre dos instantes de muestreo sucesivos.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 5 a 8, en el que el procesamiento implementa el filtrado de Kalman cuyo estado tiene como al menos un parámetro el rumbo real y la perturbación del rumbo magnético ($\psi, \psi^{(a)}$).

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la predicción del rumbo se determina en función de las mediciones de uno o más sensores de una unidad inercial.

11. Dispositivo para determinar el rumbo mediante sensores magnéticos, que comprende magnetómetros (20) y medios de cálculo (21, 31, 41) para calcular el rumbo a partir del campo magnético medido por dichos magnetómetros, **caracterizado porque** los medios de cálculo (21, 31, 41) realizan, para diferentes instantes sucesivos de muestreo, el procesamiento del procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores.

12. Sistema de navegación magneto-inercial que comprende al menos un dispositivo de medición de campo magnético según la reivindicación 11.

13. Uso de un sistema según la reivindicación 12 en aplicaciones en un entorno urbano o en el interior de edificios.

5 14. Producto de programa de ordenador que comprende instrucciones de código para ejecutar un procedimiento de medición de campo magnético según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

15. Medio de almacenamiento legible por un equipo informático en el que un producto de programa informático comprende instrucciones de código para ejecutar un procedimiento de medición de campo magnético según una de las reivindicaciones 1 a 10.

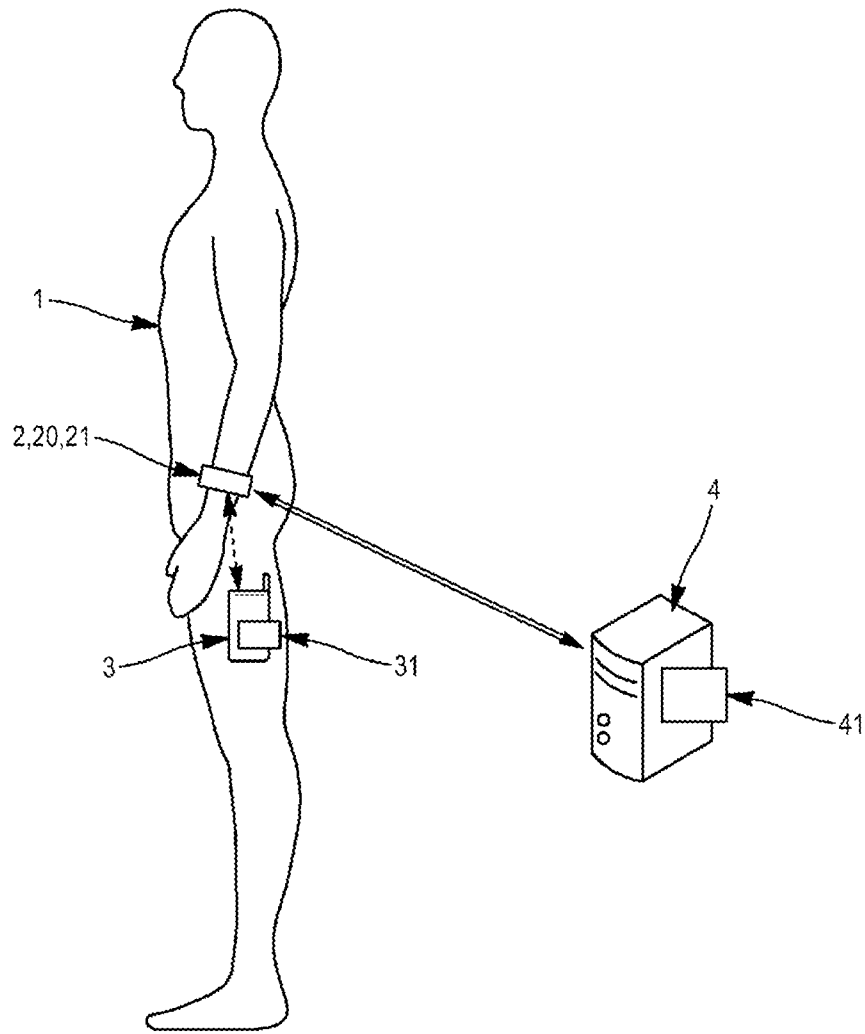


FIG. 1

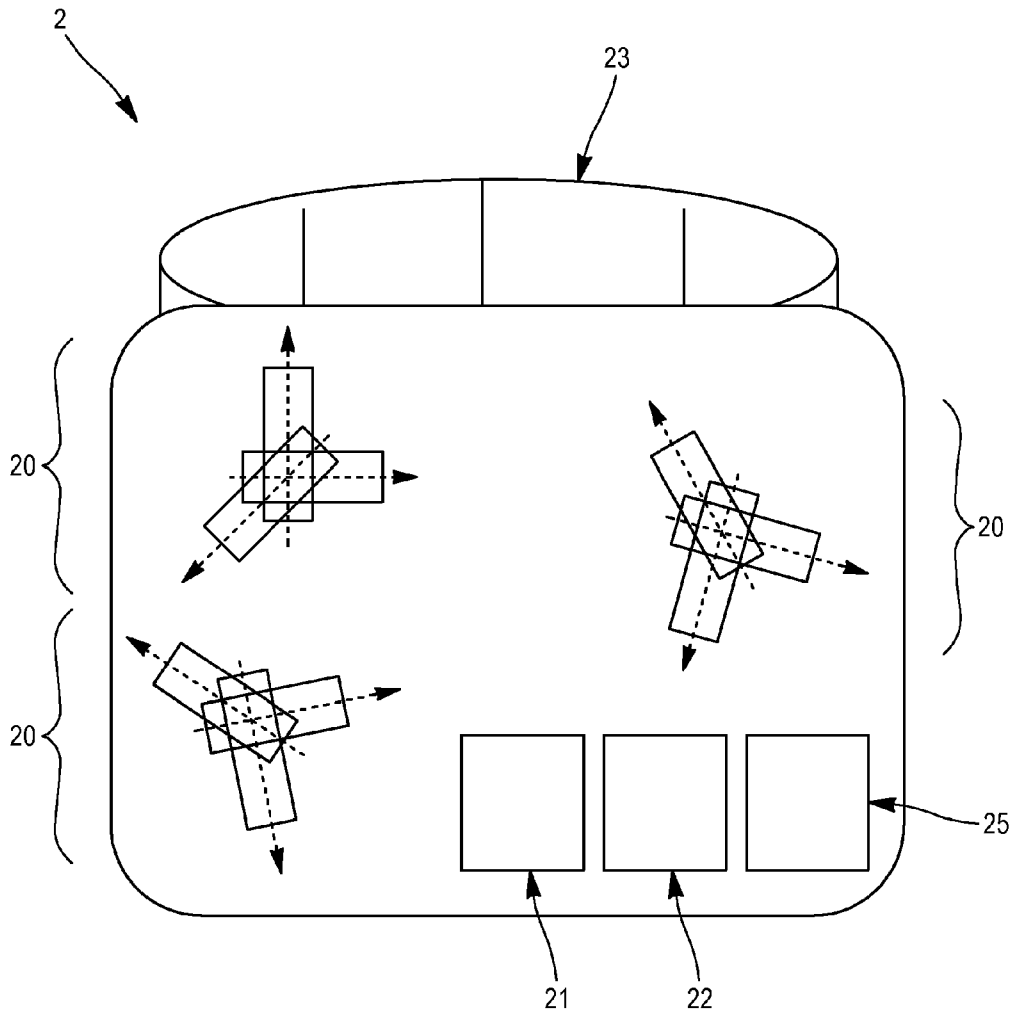


FIG. 2

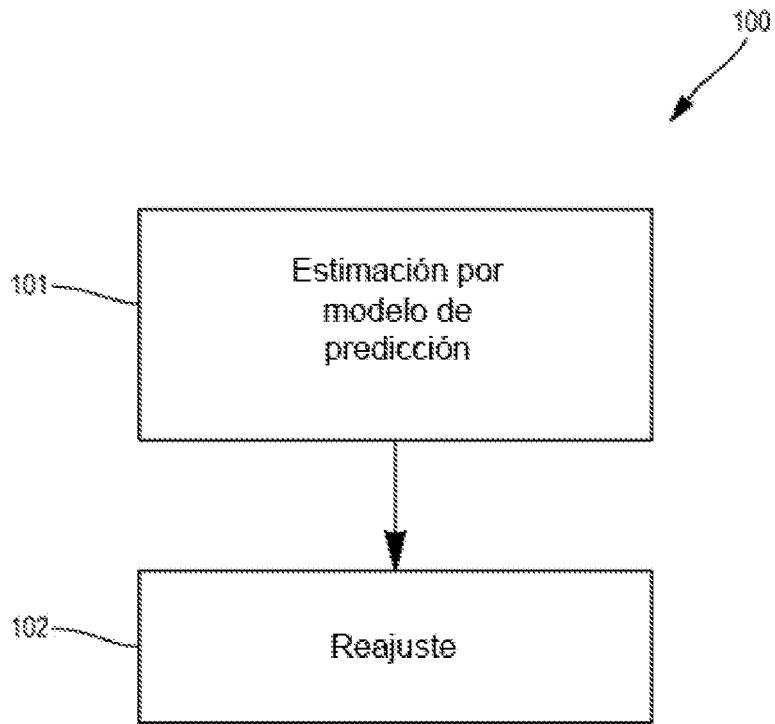


FIG. 3