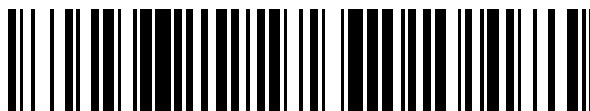


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 751 719**

51 Int. Cl.:

G01R 33/00 (2006.01)

A61B 5/06 (2006.01)

G01V 3/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.12.2017 E 17210724 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2019 EP 3343240**

54 Título: **Red de magnetómetros vectoriales y procedimiento de localización correspondiente**

30 Prioridad:

02.01.2017 FR 1750010

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

01.04.2020

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
Bâtiment Le Ponant, 25 Rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**LE PRADO, MATTHIEU;
ALOU, SAIFEDDINE y
LABYT, ETIENNE**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 751 719 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

Red de magnetómetros vectoriales y procedimiento de localización correspondiente

5 **Campo técnico**

El campo de la invención es el de la formación de imágenes de los campos biomagnéticos y se refiere, más particularmente, a las redes de magnetómetros vectoriales utilizados, en concreto, en magnetocardiografía o en magnetoencefalografía.

10

Estado de la técnica anterior

Unos magnetoencefalógrafos utilizados hoy en día explotan unos magnetómetros de tecnología SQUID ("Superconducting Quantum Interference Device", "Dispositivo de Interferencia Cuántica Superconductora") que están englobados en un soporte rígido, de tipo Dewar, que contiene, igualmente, unos líquidos criogénicos. El inconveniente de estos dispositivos es que su geometría inmutable está diseñada para poder acomodar las cabezas más gruesas. Por lo tanto, los magnetómetros distribuidos, en concreto, sobre los lados de un casco del magnetoencefalógrafo permanecen distantes del cerebro de las personas que tienen unas cabezas pequeñas, en particular, los niños. De ello se desprenden unos rendimientos limitados.

20

Las redes de magnetómetros vectoriales, en particular, los magnetómetros de bombeo óptico, no necesitan criogenia y permiten diseñar unos magnetoencefalógrafos portados por una estructura conformable, esto es, de geometría variable, en condiciones de poder adaptarse a las diferentes morfologías (en el presente documento, diferentes formas de cabeza) de paciente.

25

Pero, con el fin de poder interpretar correctamente los datos recopilados por una red de magnetómetros de este tipo, hay que poder tener un conocimiento previo de la localización, en posición y en orientación, de los magnetómetros según la geometría que el soporte conformable va a adoptar para adaptarse al paciente.

30 **Exposición de la invención**

La invención contempla responder a esta necesidad y propone, para hacer esto, un procedimiento definido por la reivindicación 1 para la localización de al menos un magnetómetro vectorial, en concreto, un magnetómetro de un aparato de magnetocardiografía o de magnetoencefalografía. El procedimiento comprende las siguientes etapas:

35

- generación, por una fuente de campo magnético, de m campos magnéticos de referencia, siendo m un número entero superior o igual a 2, conociéndose las amplitudes de los m campos magnéticos y conociéndose las direcciones de los m campos magnéticos y siendo distintas;
- medición de los m campos magnéticos de referencia según n ejes del al menos un magnetómetro vectorial, siendo n un número entero superior o igual a 2 y siendo m y n tales que $m \cdot n \geq 6$;
- determinación de la posición y de la orientación, con respecto a la fuente de campo magnético, del al menos un magnetómetro vectorial a partir de la medición de los m campos magnéticos de referencia sobre los n ejes del al menos un magnetómetro vectorial.

40

45 Algunos aspectos preferidos, pero no limitativos, de este procedimiento son los siguientes:

- los m campos magnéticos de referencia se emiten simultáneamente, siendo las amplitudes de los m campos magnéticos distintas;
- los m campos magnéticos de referencia se emiten secuencialmente;
- 50 - la etapa de generación comprende un intervalo temporal de no generación de un campo magnético de referencia, una medición del campo magnético ambiental según los n ejes del al menos un magnetómetro vectorial a localizar se realiza en el transcurso de dicho intervalo temporal y la etapa de determinación comprende una sustracción de la medición del campo magnético ambiental a la medición de los m campos magnéticos de referencia;
- 55 - la fuente de campo magnético realiza una modulación frecuencial de los m campos magnéticos de referencia;
- la fuente de campo magnético realiza una multiplexación frecuencial de los m campos magnéticos de referencia;
- la fuente de campo magnético comprende m bobinas y un generador de frecuencia que permite inyectar una corriente de amplitud conocida en cada una de las m bobinas;
- el al menos un magnetómetro vectorial a localizar pertenece a una red de magnetómetros vectoriales y la fuente de campo magnético es una fuente externa a dicha red;
- 60 - el al menos un magnetómetro vectorial a localizar pertenece a una red de magnetómetros vectoriales y la fuente de campo magnético es uno de los magnetómetros vectoriales de dicha red;
- las etapas de generación, medición y determinación se reiteran utilizando como fuente de campo magnético otro magnetómetro vectorial de dicha red;
- 65 - las etapas de medición y de determinación se implementan por el o los magnetómetros de la red situados en una zona de emisión alrededor de la fuente de campo magnético y dicho otro magnetómetro se elige de entre dicho o

- dichos magnetómetros de la red situados en la zona de emisión alrededor de la fuente de campo magnético;
- el al menos un magnetómetro vectorial es portado por una estructura conformable y el procedimiento comprende una etapa previa de instalación de la estructura conformable en un usuario.

5 La invención se extiende a un aparato de medición configurado para implementar este procedimiento. Este aparato está definido por la reivindicación 13.

Breve descripción de los dibujos

10 Otros aspectos, objetivos, ventajas y características de la invención se harán más evidentes a la lectura de la siguiente descripción detallada de formas de realización preferidas de esta, dada a título de ejemplo no limitativo y hecha con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- la figura 1 es un esquema de un modo de realización posible del procedimiento de acuerdo con la invención;
- 15 - la figura 2 es un esquema que ilustra la localización de magnetómetros receptores en relación con un magnetómetro emisor;
- la figura 3 ilustra una localización paso a paso, con recubrimiento, que se puede realizar en el marco de la invención.

20 **Exposición detallada de modos de realización particulares**

La invención trata sobre un aparato de medición de campo magnético, en concreto, un aparato que encuentra aplicación en el campo médico para la formación de imágenes de los campos biomagnéticos, tal como un aparato magnetoencefalografía o de magnetocardiografía y, más particularmente, un aparato dotado de magnetómetros vectoriales dispuestos en red. La invención trata, más particularmente, sobre un aparato configurado para permitir la implementación del procedimiento de localización de los magnetómetros descrito a continuación.

La red de magnetómetros vectoriales es portada, normalmente, por una estructura conformable destinada a ser portada por un usuario adaptándose a su morfología. En magnetoencefalografía, la estructura conformable toma la forma de un casco en condiciones de casar con la forma del cráneo del usuario en el que está instalado, encontrándose cada magnetómetro directamente en contacto con el cráneo.

El procedimiento según la invención comprende, de este modo, una etapa previa de instalación de la estructura conformable en el usuario. La localización de los diferentes magnetómetros depende, de este modo, de la morfología del usuario y, por lo tanto, es conveniente disponer de un conocimiento de esta localización antes de utilizar el aparato para la formación de imágenes de los campos biomagnéticos.

Los magnetómetros vectoriales de la red permiten una medición del campo magnético según una dirección física. Se trata, por ejemplo, de magnetómetros de bombeo óptico. Estos magnetómetros emplean una celda llena de un gas de átomos, una fuente láser que emite un haz polarizado en dirección de la celda, así como un fotodetector adecuado para suministrar una señal de salida representativa del haz que ha atravesado la celda. Al menos una bobina, tres normalmente, rodea la celda y está alimentada por un generador de frecuencia para generar un campo magnético de excitación sinusoidal, perpendicular a la dirección de polarización de los fotones procedentes del láser si están polarizados rectilíneamente y perpendicular al haz láser si están polarizados circularmente. El fotodetector permite medir la amplitud de la señal de salida en un armónico de la frecuencia de oscilación del campo magnético de excitación. Esta amplitud es directamente proporcional al campo a medir, por lo menos cuando este es lo suficientemente escaso, lo que es el caso para las aplicaciones contempladas para las que la amplitud de las señales biomagnéticas procedentes del corazón o del cerebro es inferior a 1 nT.

Estas bobinas se pueden utilizar para generar unos campos magnéticos de amplitudes y direcciones conocidas, es decir, de momento magnético \vec{m} conocido. En un caso perfecto, una bobina genera un campo magnético dipolar \vec{B} y este campo magnético dipolar de momento magnético \vec{m} medido en una posición relativa \vec{r} admite el siguiente valor:
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi d^3} (3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r} - d^2 \vec{m})$$
, con μ_0 la permeabilidad magnética del vacío y d la distancia entre la bobina y la posición relativa. Se observará que un modelo más avanzado de esta medición del campo \vec{B} en la posición relativa \vec{r} puede desarrollarse a partir de las ecuaciones de Biot y Savart.

La invención explota esta posibilidad, con el fin de determinar la posición y la orientación relativa de los diferentes magnetómetros de la red. Utiliza uno de los magnetómetros de la red en calidad de emisor de campo magnético de referencia (como variante, se puede utilizar una fuente externa a la red), mientras que los otros magnetómetros miden el campo magnético emitido. Entonces, se busca volver a la posición y la orientación de los magnetómetros de medición con respecto al magnetómetro emisor del campo magnético de referencia.

Con referencia a la figura 1, la invención trata, de este modo, sobre un procedimiento de localización de al menos un magnetómetro vectorial, que comprende las siguientes etapas.

65

Una primera etapa comprende la generación, por una fuente de campo magnético, de m campos magnéticos de referencia, siendo m un número entero superior o igual a 2, conociéndose las amplitudes de los m campos magnéticos y conociéndose las direcciones de los m campos magnéticos y siendo distintas.

- 5 Una segunda etapa comprende la medición de los m campos magnéticos de referencia según n ejes del al menos un magnetómetro vectorial a localizar, siendo n un número entero superior o igual a 2 y siendo m y n tales que $m \cdot n \geq 6$.

- 10 Una tercera etapa comprende la determinación de la posición y de la orientación, con respecto a la fuente de campo magnético, del al menos un magnetómetro vectorial a partir de la medición de los m campos magnéticos de referencia sobre los n ejes del al menos un magnetómetro vectorial.

- 15 Se recordará que, para determinar la posición y la orientación de los magnetómetros con respecto a la fuente de campo magnético, son necesarias al menos 6 mediciones no correlacionadas. Para hacer esto, la fuente genera $m \geq 2$ campos magnéticos cuyos momentos magnéticos equivalentes se dirigen en unas direcciones distintas, midiéndose estos campos sobre varios, $n \geq 2$, ejes de cada magnetómetro, de modo que $m \times n$ haga al menos 6. Un número superior de mediciones permite tener redundancia y aportar más información, así como filtrar el ruido de medición.

- 20 La invención explota, de este modo, una fuente de campo magnético que puede generar unos campos magnéticos descritos en un sistema de referencia local vinculado a la fuente y, más particularmente, una fuente de campo magnético que comprende m bobinas y un generador de frecuencia que permite inyectar una corriente de amplitud conocida en cada una de las m bobinas. Normalmente, se recurre a una fuente de tres ejes que emite tres campos magnéticos, ya sea de forma simultánea, ya sea de forma secuencial.

- 25 El o los magnetómetros a localizar son unas entidades capaces de medir uno o varios componentes de un campo magnético. Normalmente, un magnetómetro de tres ejes mide la proyección del vector campo magnético sobre tres ejes descritos en un sistema de referencia local al magnetómetro.

- 30 Sea \vec{x}_i^j el vector de estado a estimar que describe la posición y orientación del magnetómetro a localizar de índice j en el sistema de referencia de la fuente de índice i . Este vector puede estar compuesto, por ejemplo, por 6 o 7 parámetros:

- 3 coordenadas cartesianas (u otra forma de coordenadas: cilíndricas, esféricas...) que definen la posición del magnetómetro a localizar con respecto a la fuente;
- 3 ángulos de rotación u otra forma equivalente que describen una rotación (por ejemplo, 3 coordenadas del eje de revolución + ángulo de rotación o bien un cuaternión...).

- 40 Sea $\vec{B}_j^i = \vec{h}(\vec{x}_i^j)$ la ecuación que describe la medición del/de los campos magnético(s) de referencia emitido(s) por la fuente i y medido(s) por el magnetómetro j . Durante la etapa de localización LOC $_j$, se llega a invertir la función $\vec{h}(\vec{x}_i^j)$, con el fin de estimar el vector de estado (\vec{x}_i^j) a partir de las mediciones \vec{B}_j^i .

- 45 En un primer modo de realización posible, el al menos un magnetómetro vectorial a localizar pertenece a una red de magnetómetros vectoriales y la fuente de campo magnético es una fuente externa a dicha red. Esta fuente puede comprender, en concreto, al menos m bobinas que abarcan la red y un generador de frecuencia que permite inyectar una corriente de amplitud conocida en las m bobinas.

- 50 En un segundo modo de realización de la invención, el al menos un magnetómetro vectorial a localizar pertenece a una red de magnetómetros vectoriales y la fuente de campo magnético es uno de los magnetómetros de la red. En este segundo modo de realización, se utilizan m bobinas ya presentes en los magnetómetros para operar uno de estos en calidad de fuente de campo magnético y un generador de frecuencia que permite inyectar una corriente de amplitud conocida en cada una de estas m bobinas.

- 55 Los magnetómetros de bombeo óptico emplean, efectivamente, unas bobinas para generar unos campos magnéticos de baja frecuencia, por ejemplo, en el rango [0-300] Hz. Están equipados, por ejemplo, con bobinas de Helmholtz de 1 cm de diámetro, cuya cada espira está compuesta por un solo hilo recorrido por una corriente i de 1 mA. Su momento magnético es $\vec{M}_0 = 2.S.i \vec{U}_z = 1,57 \cdot 10^{-7} \text{ A.m}^2$ según el eje \vec{U}_z . Esta corriente permite generar unos campos magnéticos de amplitud superior o igual a 2 nT y 2 pT a 2 y 20 cm respectivamente, que son fácilmente detectables por unos magnetómetros de bombeo óptico que están afectados por un ruido de $200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ de 1 a 100 Hz. En las aplicaciones contempladas, los magnetómetros a localizar se colocan a menos de 20 cm del magnetómetro fuente. Todos los magnetómetros de la red pueden detectar, de este modo, el campo magnético generado por la fuente y estar localizados.

- 60 En este marco, se observará que la disposición de los magnetómetros de la red permite una localización cuyos efectos de las perturbaciones, de origen de baja frecuencia para la mayoría, pueden minimizarse utilizando una

banda que supere 10 Hz para evitar el campo ambiental y por debajo de 100 Hz para limitar los campos de Foucault. Además, estos magnetómetros pueden emitir unos campos magnéticos muy escasos en intensidad que favorece la posibilidad de efectuar una localización secuencial de los magnetómetros, tal como se describe a continuación.

5 La figura 2 ilustra la localización de magnetómetros receptores C1-C3 en relación con un magnetómetro emisor S, perteneciendo estos diferentes magnetómetros C1-C3, S a una red de magnetómetros portada por un casco conformable instalado en la cabeza T de un usuario. El magnetómetro emisor S se controla para emitir un campo magnético de referencia de momento magnético conocido, de amplitud M_{0x} , M_{0y} , M_{0z} sobre cada uno de los ejes x, y y z del sistema de referencia asociado al magnetómetro emisor S. El procedimiento según la invención permite
10 determinar la posición y la orientación, con respecto al magnetómetro emisor S, de los magnetómetros a localizar C1-C3.

Durante la etapa de generación EMI de los m campos magnéticos de referencia de momentos magnéticos conocidos y dirigidos según unas direcciones distintas, estos m campos se pueden generar de forma secuencial. Estos campos se generan, de este modo, por turnos e individualmente. Estando cada campo generado de forma continua en una franja temporal fija dedicada a él, se puede hablar de multiplexación temporal.

El entorno del aparato de medición puede estar blindado, de manera que se elimina el campo ambiental. Como variante, el entorno del aparato de medición puede no estar blindado y la multiplexación temporal comprende, entonces, un intervalo temporal de no generación de un campo magnético de referencia. La medición del campo magnético ambiental según los n ejes de un magnetómetro vectorial a localizar se realiza, entonces, en el transcurso de dicho intervalo temporal y la determinación de la posición y de la orientación, con respecto a la fuente de campo magnético, del magnetómetro vectorial comprende una sustracción de la medición del campo magnético ambiental a la medición de los campos magnéticos de referencia.

Los campos generados no son necesariamente continuos, la invención se extiende a la generación de campos magnéticos de referencia variables, por ejemplo, por medio de una modulación frecuencial de los campos magnéticos de referencia introducida por la fuente de campo magnético. La amplitud y la fase de la señal recibida por un magnetómetro a localizar permiten determinar el vector campo magnético equivalente. Esta técnica permite, de este modo, eliminar el campo ambiental sin tener necesidad de blindaje. En este marco, los campos magnéticos de referencia se pueden generar de forma secuencial, como se ha presentado anteriormente. Alternativamente, la fuente de campo magnético realiza una multiplexación frecuencial de los m campos magnéticos de referencia, generándose estos simultáneamente explotando unas frecuencias portadoras diferentes sobre cada uno de los m ejes.

La generación simultánea de los m campos magnéticos de referencia se puede realizar, igualmente, realizando una modulación de amplitud de dichos campos para que las amplitudes de los m campos magnéticos sean distintas.

Además, la dirección de un campo magnético de referencia no es necesariamente continua. De este modo, es posible hacer variar esta dirección, por ejemplo, hasta encontrar la dirección que maximiza la amplitud del campo medido por un magnetómetro a localizar.

En el marco del segundo modo de realización en el que uno de los magnetómetros de la red se utiliza en calidad de fuente de campo magnético, es posible llegar a reiterar las etapas de generación, medición y determinación utilizando como fuente de campo magnético otro magnetómetro vectorial de dicha red. De este modo, se pueden utilizar en turnos varios magnetómetros de la red para generar los campos de referencia. Esta reiteración se ilustra en la figura 1 por el bloque "MODi" que representa el cambio de magnetómetro destinado a ser utilizado como fuente de campos de referencia durante la etapa EMI.

En el marco de esta variante y después de un número de reiteración dado, por ejemplo, igual al número de magnetómetros que componen la red, de modo que cada uno haya sido operado en turnos como fuente de campos de referencia, el procedimiento puede incluir una etapa que consiste en promediar las posiciones y orientaciones de un magnetómetro a localizar determinadas al final de las etapas de determinación, de manera que se obtiene una mejor estimación de la localización del magnetómetro vectorial.

El enlace entre la posición de un magnetómetro j en un sistema de referencia i y su posición en un sistema de referencia b se puede describir como sigue: $\vec{p}_j^b = \mathbf{R}_i^b \vec{p}_j^i + p_i^b$.

En el presente documento, \vec{p}_j^i es el vector localización del magnetómetro j en el sistema de referencia de la fuente i y \mathbf{R}_i^b es la matriz de rotación que describe la orientación del punto de referencia i descrito en el punto de referencia b. De este modo, se puede llegar a promediar los vectores localización \vec{p}_j^i del magnetómetro j obtenidos recurriendo a diferentes fuentes i, llegando a expresar estas diferentes localizaciones en un mismo sistema de referencia b.

Se puede encontrar una estimación $\widehat{\vec{p}}_j^b$ del vector \vec{p}_j^b y una estimación $\widehat{\mathbf{R}}_i^b$ de la matriz \mathbf{R}_i^b que minimizan el error

cuadrático:

$$(\widehat{\mathbf{R}}_i^b, \widehat{\vec{p}}_i^b) = \underset{\mathbf{R}_i^b, \vec{p}_i^b}{\operatorname{argmin}} \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}_i^b \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}_i^b \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}_i^b \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}_i^b \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}$$

5 También se pueden encontrar los ángulos de Euler ($\widehat{\theta}_i^b$) o bien el cuaternión \widehat{q}_i^b que representa la matriz \mathbf{R}_i^b :

$$(\widehat{\theta}_i^b, \widehat{\vec{p}}_i^b) = \underset{\theta_i^b, \vec{p}_i^b}{\operatorname{argmin}} \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(\theta_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(\theta_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(\theta_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(\theta_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}$$

$$(\widehat{q}_i^b, \widehat{\vec{p}}_i^b) = \underset{q_i^b, \vec{p}_i^b}{\operatorname{argmin}} \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}$$

10 Es posible, igualmente, añadir una ponderación a esta minimización, con el fin de dar más peso a los magnetómetros que dan las estimaciones más precisas. La precisión de la estimación depende de la relación señal a ruido medida por un magnetómetro, estando los magnetómetros receptores más cercanos al magnetómetro emisor mejor localizados que los magnetómetros receptores más alejados. Para ello, se utiliza la matriz de ponderación W mencionada a continuación:

$$(\widehat{q}_i^b, \widehat{\vec{p}}_i^b) = \underset{q_i^b, \vec{p}_i^b}{\operatorname{argmin}} \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}^T W \begin{pmatrix} \vec{p}_1^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_1^b + \vec{p}_i^b \\ \vdots \\ \vec{p}_N^i - \mathbf{R}(q_i^b) \vec{p}_N^b + \vec{p}_i^b \end{pmatrix}$$

20 Siempre en el marco del segundo modo de realización en la que uno de los magnetómetros de la red se utiliza en calidad de fuente de campo magnético, las etapas de medición y de determinación se pueden implementar por el o los magnetómetros de la red situados en una zona de emisión predeterminada alrededor de la fuente de campo magnético. La zona de emisión cubre normalmente los magnetómetros más cercanos al magnetómetro fuente, por ejemplo, los situados a un máximo de saltos dado del magnetómetro de referencia en la red (correspondiendo a un magnetómetro de un salto a un magnetómetro inmediatamente adyacente). Entonces, es posible proceder a la reiteración de las diferentes etapas del procedimiento utilizando como nuevo magnetómetro fuente un magnetómetro presente en dicha zona de emisión alrededor del magnetómetro utilizado como fuente durante la iteración anterior.

30 De esta forma, se puede realizar una localización secuencial que permite garantizar una buena precisión de la estimación, dependiendo esta, efectivamente, de la relación señal a ruido y conduciendo a que los magnetómetros más cercanos estén mejor localizados que los magnetómetros más alejados. Esta localización secuencial permite una estimación de localización de forma incremental, paso a paso. En efecto, se puede determinar la posición de todos los magnetómetros en el sistema de referencia de uno de los magnetómetros emisores de forma secuencial según: $\vec{p}_j^i = \mathbf{R}_i^b \vec{p}_j^b + p_i^b$, donde \mathbf{R}_i^b es la matriz de rotación del sistema de referencia vinculado a la fuente i descrito en el sistema de referencia vinculado a la fuente b y p_i^b es el vector que describe la posición de la fuente i en el sistema de referencia vinculado a la fuente b. De forma secuencial, se pueden encontrar, por lo tanto, las posiciones de los sensores paso a paso, expresadas en el sistema de referencia vinculado a la fuente b.

40 En una variante ventajosa, el nuevo magnetómetro a utilizar como fuente durante una nueva iteración presenta una zona de emisión que se superpone con la del magnetómetro utilizado como fuente durante una iteración anterior.

45 En la figura 3, se ha representado un ejemplo de red con zonas sucesivas de emisión superpuestas. En esta figura, durante una primera iteración del procedimiento, un primer magnetómetro S1 se utiliza como fuente con una primera zona de emisión Z1. Se encuentra un segundo magnetómetro S2 en esta primera zona de emisión Z1 y se llega a determinar su localización en relación con el primer magnetómetro S1. Durante una segunda iteración del procedimiento, el segundo magnetómetro S2 se utiliza como fuente con una segunda zona de emisión Z2. Se

encuentra el primer magnetómetro S1 y un tercer magnetómetro S3 en esta segunda zona de emisión Z2 y se llega a determinar sus localizaciones en relación con el segundo magnetómetro S2. Durante una tercera iteración del procedimiento, el tercer magnetómetro S3 se utiliza como fuente con una tercera zona de emisión Z3. Se encuentra el segundo magnetómetro S2 en esta tercera zona de emisión Z3 y se llega a determinar su localización en relación con el tercer magnetómetro S3. Previendo unas zonas de emisión superpuestas, se determina para el segundo magnetómetro S2 a la vez su localización con respecto al primer magnetómetro S1 y su localización con respecto al tercer magnetómetro S3. De esta forma, resulta posible estimar mejor la localización del segundo magnetómetro S2 con respecto a los diferentes magnetómetros fuente. Y como se ha presentado más arriba, es posible volver de forma secuencial a una localización absoluta, por ejemplo, con respecto a un único magnetómetro de índice b de la red, de cada uno de los magnetómetros de la red. Por ejemplo, partiendo de la localización del tercer magnetómetro S3 con respecto al segundo magnetómetro S2 y conociendo la localización del segundo magnetómetro S2 con respecto al primer magnetómetro S1, se puede determinar la localización del tercer magnetómetro S3 con respecto al primer magnetómetro S1.

Estas localizaciones secuencial o por zonas superpuestas permiten responder al problema de la potencia de emisión limitada que puede generar un magnetómetro fuente que puede hacer imposible la estimación de posición debido al ruido ambiental que afecta la medición por un magnetómetro de medición. La puesta en campo nulo por medio de un blindaje del aparato de medición se puede realizar, igualmente, con el fin de suprimir este ruido ambiental.

La invención no se limita al procedimiento tal como se ha descrito anteriormente, sino que se extiende, igualmente, a un aparato de medición del campo magnético, tal como un aparato de magnetocardiografía o de magnetoencefalografía y, en concreto, un aparato que comprende:

- una fuente de campo magnético configurada para generar m campos magnéticos de referencia, siendo m un número entero superior o igual a 2, conociéndose las amplitudes de los m campos magnéticos y conociéndose las direcciones de los m campos magnéticos y siendo distintas;
- al menos un magnetómetro vectorial configurado para medir los m campos magnéticos de referencia según n ejes, siendo n un número entero superior o igual a 2 y siendo m y n tales que $m \cdot n \geq 6$; y
- un aparato de cálculo configurado para determinar la posición y la orientación, con respecto a la fuente de campo magnético, del al menos un magnetómetro vectorial a partir de la medición de los m campos magnéticos de referencia sobre los n ejes del al menos un magnetómetro vectorial.

Anteriormente, se ha visto que la ecuación $\vec{B}_j^i = \vec{h}(\vec{x}_j^i)$ describe la medición del/de los campos magnético(s) de referencia emitido(s) por la fuente i y medido(s) por el magnetómetro j y que se llega a invertir la función $\vec{h}(\vec{x}_j^i)$ durante la etapa de localización para estimar el vector de estado x_j^i a partir de las mediciones \vec{B}_j^i .

La solución a este problema de inversión no se determina, generalmente, de forma exacta a causa de la presencia de ruido que da un carácter probabilístico a las mediciones. Se recurre, por lo tanto, a un estimador, con el fin de determinar el vector de estado que minimiza un criterio bien determinado con, como opción, un modelo de evolución que permite seguir la posición de los magnetómetros en el tiempo. Por lo tanto, se introduce la noción de tiempo que permitirá, a continuación, añadir un filtrado sobre las mediciones:

$$\vec{B}_j^i(t) = \vec{h}(\vec{x}_j^i(t)) + \vec{\omega}_j^i(t)$$

En el presente documento, $\vec{\omega}_j^i$ es el ruido de medición sobre el campo emitido por i y medido por j. Es una variable aleatoria que depende de las características del emisor y del receptor. Este ruido está dominado, a menudo, por el ruido térmico.

Un primer ejemplo de técnica posible para realizar esta inversión en un instante t es una minimización de tipo mínimos cuadrados. El objetivo, en el presente documento, es encontrar el valor $\hat{x}_j^i(t)$ que minimiza el error cuadrático entre la medición real y la medición estimada:

$$\hat{x}_j^i(t) = \underset{\vec{x}_j^i(t)}{\operatorname{argmin}} \left(\left[\vec{h}(\vec{x}_j^i(t)) - \vec{B}_j^i(t) \right]^T \left[\vec{h}(\vec{x}_j^i(t)) - \vec{B}_j^i(t) \right] \right)$$

Como esta función no es lineal, se pueden utilizar unas técnicas de optimización, tal como el descenso de gradiente, Gauss-Newton o también Levenberg-Marquardt.

En el caso particular de estimación de constelación de posiciones de magnetómetros fijos o casi fijos, es posible considerar que la posición $\vec{x}_j^i(t)$ no varía en una ventana de tiempo de n muestras. Esto permite filtrar mejor los ruidos de los sensores promediando la información obtenida por las mediciones en los instantes t_i . La función a minimizar se convierte, entonces, en:

5

$$\hat{\vec{x}}_j^i = \underset{\vec{x}_j^i}{\operatorname{argmin}} \left(\left[\begin{array}{c} \vec{h}(\vec{x}_j^i(t_1)) \\ \vdots \\ \vec{h}(\vec{x}_j^i(t_n)) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \vec{B}_j^i(t_1) \\ \vdots \\ \vec{B}_j^i(t_n) \end{array} \right] \right)^T \left[\begin{array}{c} \vec{h}(\vec{x}_j^i(t_1)) \\ \vdots \\ \vec{h}(\vec{x}_j^i(t_n)) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \vec{B}_j^i(t_1) \\ \vdots \\ \vec{B}_j^i(t_n) \end{array} \right] \right)$$

Según un segundo ejemplo de técnica de inversión, se utiliza un estimador de máximo de verosimilitud que busca encontrar el $\hat{\vec{x}}_j^i(t)$ que maximiza la probabilidad de obtener las mediciones reales (esto es, las \vec{B}_j^i):

10

$$\hat{\vec{x}}_j^i(t) = \underset{\vec{x}_j^i(t)}{\operatorname{argmax}} l(\hat{\vec{x}}_j^i(t), \vec{B}_j^i(t))$$

En el presente documento, l es la función de verosimilitud ("Likelihood").

15 Como para el caso anterior, es posible considerar que la posición $\hat{\vec{x}}_j^i(t)$ no varía sobre una ventana de tiempo de n muestras. El estimador se convierte, entonces, en:

$$\hat{\vec{x}}_j^i = \underset{\vec{x}_j^i}{\operatorname{argmax}} l(\hat{\vec{x}}_j^i, \vec{B}_j^i(t_1), \dots, \vec{B}_j^i(t_n))$$

20 En esta técnica, se utiliza un marco probabilístico. Por lo tanto, es posible introducir unas informaciones físicas sobre la calidad de la medición dada por los magnetómetros.

En otro ejemplo de técnica de inversión, se utiliza un modelo de evolución que permite filtrar las mediciones en el tiempo y dar a los magnetómetros la posibilidad de moverse en el tiempo. Los algoritmos que se prestan a este marco son, a menudo, los algoritmos de estimación bayesianos, tales como los filtros de Kalman o también los filtros de partículas.

25

Por ejemplo, utilizando un filtro de Kalman en forma discreta y tomando como función de evolución la identidad (se supone que el sensor puede moverse de una forma aleatoria (gaussiana) alrededor de su posición en el instante anterior, se parte del siguiente sistema de estado:

30

$$\vec{x}_j^i(t_k) = \vec{x}_j^i(t_{k-1}) + \vartheta_j^i(t_{k-1})$$

$$\vec{B}_j^i(t_k) = \vec{h}(\vec{x}_j^i(t_k)) + \omega_j^i(t_k)$$

En el presente documento, $\vartheta_j^i(t_{k-1})$ es el ruido de estado que describe la incertidumbre sobre el movimiento del magnetómetro entre el instante t_{k-1} y el instante t_k (se considera que se trata de un ruido Gaussiano centrado de matriz de covarianza $\mathbf{Q}_j^i(t_{k-1})$). $\omega_j^i(t_k)$ es el ruido de medición que describe el ruido que mancha la medición (se considera que se trata de un ruido Gaussiano centrado de matriz de covarianza $\mathbf{R}_j^i(t_k)$).

35

El filtro de Kalman permite estimar de forma óptima (en el caso en que la función es lineal y el ruido es gaussiano) el vector de estado $\vec{x}_j^i(t_k)$ en cada instante t_k filtrando al mismo tiempo esta estimación utilizando unas informaciones acumuladas del pasado y unas probabilidades que describen la evolución del estado en el tiempo. El filtro de Kalman procesa el vector de estado como una variable aleatoria gaussiana descrita por una expectativa $\hat{\vec{x}}_j^i(t_k)$ y una matriz de covarianza $\hat{\mathbf{P}}_j^i(t_k)$.

40

45 Se requiere una estimación inicial del estado. Se trata de una variable aleatoria, puesto que no se conocen las

posiciones de los magnetómetros de forma muy precisa al comienzo del experimento. Esta inicialización es un conocimiento *a priori* de las posiciones de los magnetómetros. Está descrita por una expectativa $\hat{\vec{x}}_j^i(t_0)$ y una matriz de covarianza $\widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_0)$ que da una información sobre la incertidumbre que se tiene sobre esta posición inicial.

- 5 En cada instante de medición t_k , los magnetómetros miden los campos magnéticos emitidos por la fuente y estiman su estado en dos etapas. La primera etapa llamada predicción, utiliza la primera ecuación de estado, con el fin de estimar el estado actual en función del estado anterior:

$$\vec{x}_j^i(t_k)^* = \vec{x}_j^i(t_{k-1})$$

$$\widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_k)^* = \widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_{k-1}) + \mathbf{Q}_j^i(t_{k-1})$$

- 10 La segunda fase del algoritmo consiste en actualizar esta estimación utilizando la medición realizada en el instante t_k . Esta corrección se efectúa como sigue:

$$\vec{x}_j^i(t_k) = \vec{x}_j^i(t_k)^* + \mathbf{K}_j^i \vec{y}_j^i(t_k)$$

$$\widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_k) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_j^i(t_k) \mathbf{H} \left(\vec{x}_j^i(t_k) \right) \right) \widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_k)^*$$

- 15 Con H la matriz jacobiana de la función \vec{h} . $\vec{y}_j^i(t_k)$ es la innovación aportada por la medición en el instante t_k :

$$\vec{y}_j^i(t_k) = \vec{B}_j^i(t_k) - \vec{h} \left(\vec{x}_j^i(t_k) \right)$$

- 20 $\mathbf{K}_j^i(t_k)$ es la ganancia de Kalman calculada como sigue:

$$\mathbf{K}_j^i(t_k) = \widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_k)^* \mathbf{H}^T \left(\vec{x}_j^i(t_k) \right) \mathbf{S}_j^{i-1}(t_k)$$

- 25 $\mathbf{S}_j^i(t_k)$ es la matriz de covarianza de la innovación calculada como sigue:

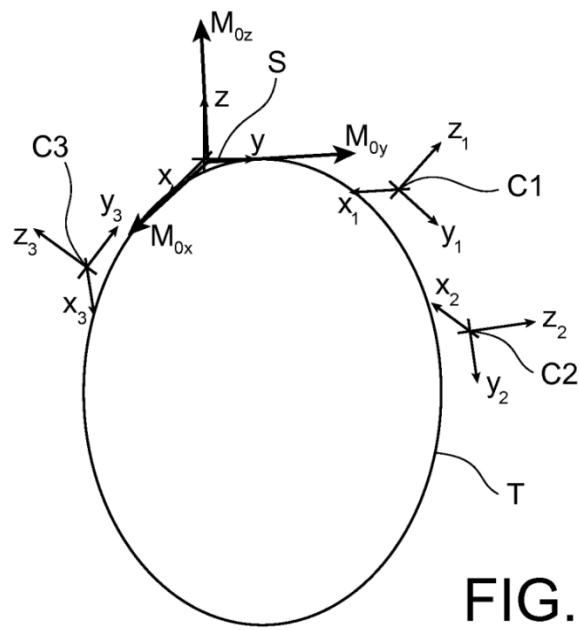
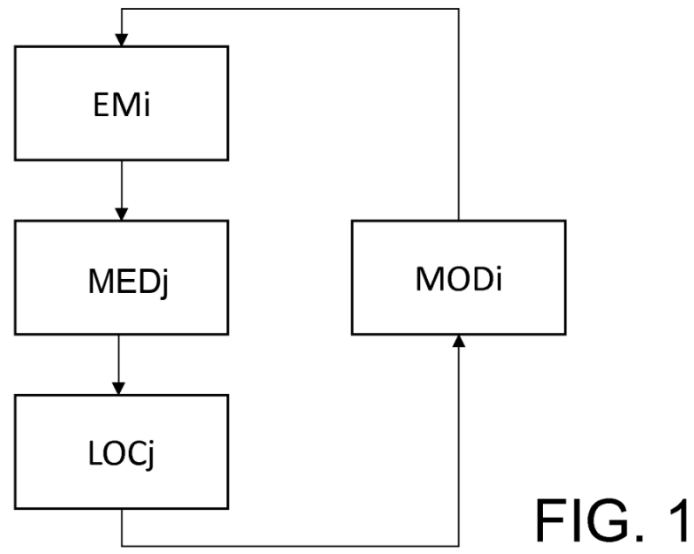
$$\mathbf{S}_j^i(t_k) = \mathbf{H} \left(\vec{x}_j^i(t_k) \right) \widehat{\mathbf{P}}_j^i(t_k)^* \mathbf{H}^T \left(\vec{x}_j^i(t_k) \right) + \mathbf{R}_j^i(t_k)$$

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de localización de al menos un magnetómetro vectorial (C1-C3) que pertenece a una red de magnetómetros vectoriales, que comprende las siguientes etapas:
 - control de uno de los magnetómetros vectoriales de la red denominado magnetómetro fuente para que genere (EMi) m campos magnéticos de referencia, siendo m un número entero superior o igual a 2, conociéndose las amplitudes de los m campos magnéticos y conociéndose las direcciones de los m campos magnéticos y siendo distintas;
 - medición (MEDj), por al menos uno de los otros magnetómetros de la red, denominado magnetómetro de medición, de los m campos magnéticos de referencia según n ejes del al menos un magnetómetro de medición (C1-C3), siendo n un número entero superior o igual a 2 y siendo m y n tales que $m \cdot n \geq 6$;
 - determinación (LOCj) de la posición y de la orientación, con respecto al magnetómetro fuente, del al menos un magnetómetro de medición (C1-C3) a partir de la medición de los m campos magnéticos de referencia sobre los n ejes del al menos un magnetómetro de medición.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los m campos magnéticos de referencia se emiten simultáneamente, siendo las amplitudes de los m campos magnéticos distintas.
3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los m campos magnéticos de referencia se emiten secuencialmente.
4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la etapa de control del magnetómetro fuente comprende un intervalo temporal de no generación de un campo magnético de referencia, una etapa de medición de un campo magnético ambiental según los n ejes del al menos un magnetómetro de medición se realiza en el transcurso de dicho intervalo temporal y la etapa de determinación comprende restar la medición del campo magnético ambiental de la medición de los m campos magnéticos de referencia.
5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el magnetómetro fuente realiza una modulación frecuencial de los m campos magnéticos de referencia.
6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que el magnetómetro fuente realiza una multiplexación frecuencial de los m campos magnéticos de referencia.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el magnetómetro fuente comprende m bobinas y un generador de frecuencia que permite inyectar una corriente de amplitud conocida en cada una de las m bobinas.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, que comprende una reiteración de las etapas de control, medición y determinación utilizando como magnetómetro fuente otro magnetómetro vectorial de dicha red.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, que comprende, además, una etapa que consiste en promediar las posiciones y orientaciones del al menos un magnetómetro de medición determinadas al final de las etapas de determinación.
10. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que las etapas de medición y de determinación se implementan por el o los magnetómetros de la red situados en una zona de emisión alrededor del magnetómetro fuente y en el que dicho otro magnetómetro vectorial se elige de entre dicho o dichos magnetómetros de la red situados en la zona de emisión alrededor del magnetómetro fuente.
11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que la zona de emisión alrededor del magnetómetro fuente y la zona de emisión de dicho otro magnetómetro vectorial se superponen.
12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que los magnetómetros vectoriales son portados por una estructura conformable y que comprende una etapa previa de instalación de la estructura conformable en un usuario.
13. Aparato de medición del campo magnético, que comprende:
 - una red de magnetómetros vectoriales que incluye:
 - o un magnetómetro fuente (S) adecuado para ser controlado para generar m campos magnéticos de referencia, siendo m un número entero superior o igual a 2, conociéndose las amplitudes de los m campos magnéticos y conociéndose las direcciones de los m campos magnéticos y siendo distintas;
 - o al menos un magnetómetro de medición (C1-C3) configurado para medir los m campos magnéticos de referencia según n ejes del al menos un magnetómetro de medición, siendo n un número entero superior o igual a 2 y siendo m y n tales que $m \cdot n \geq 6$; y

- un aparato de cálculo configurado para determinar la posición y la orientación, con respecto al magnetómetro fuente, del al menos un magnetómetro de medición a partir de la medición de los m campos magnéticos de referencia sobre los n ejes del al menos un magnetómetro de medición.

5



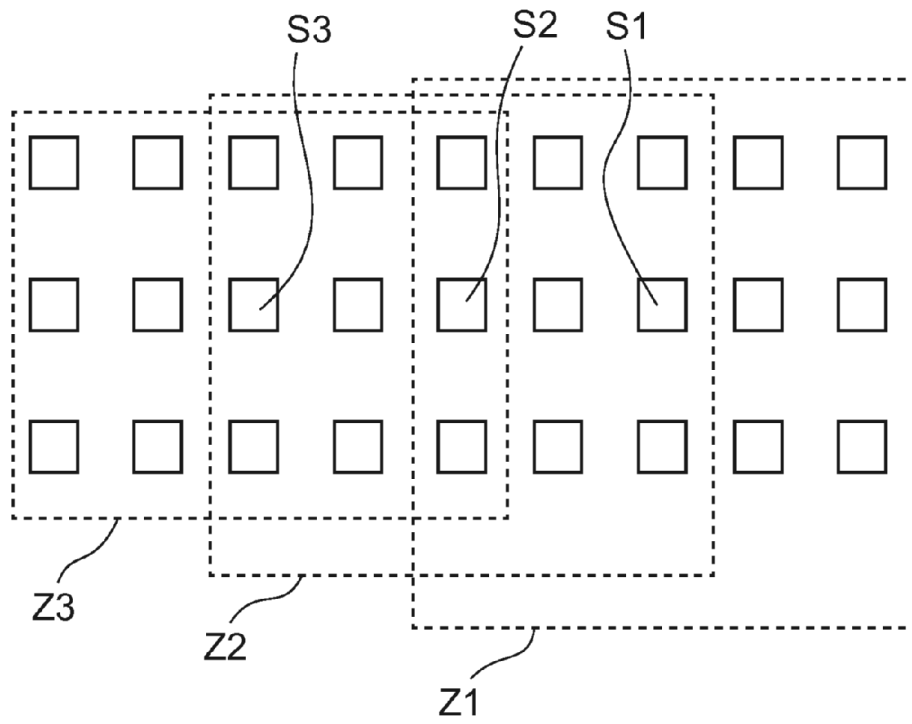


FIG. 3