

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2019/012239 A1

(43) Date de la publication internationale
17 janvier 2019 (17.01.2019)

- (51) Classification internationale des brevets :
G01C 21/16 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2018/051783
- (22) Date de dépôt international :
13 juillet 2018 (13.07.2018)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1756675 13 juillet 2017 (13.07.2017) FR
- (71) Déposant : SYSSNAV [FR/FR] ; 57, rue de Montigny,
27200 VERNON (FR).
- (72) Inventeurs : VISSIERE, David ; 41 rue des martyrs, 75009
PARIS (FR). HILLION, Mathieu ; 3 bis Place d'Evreux,
27200 VERNON (FR).
- (74) Mandataire : REGIMBEAU ; 20, rue de Chazelles, 75847
PARIS CEDEX 17 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(54) Title: METHOD FOR ESTIMATING THE MOVEMENT OF AN OBJECT MOVING IN A MAGNETIC FIELD

(54) Titre : PROCEDE D'ESTIMATION DU MOUVEMENT D'UN OBJET EVOLUANT DANS UN CHAMP MAGNETIQUE

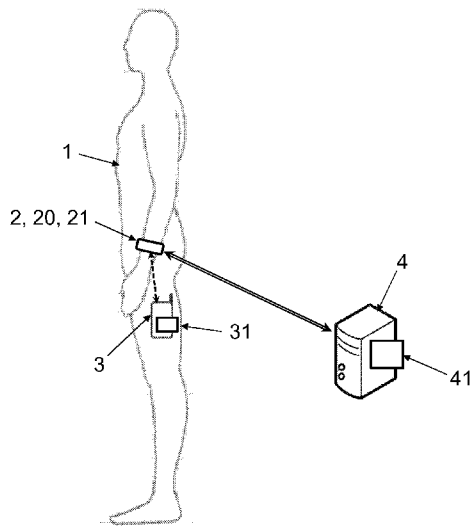


FIG. 1

(57) Abstract: The present invention concerns a method for estimating the movement of an object (1) moving in an ambient magnetic field, the method being characterised in that it comprises the steps of: (a) acquiring, by magnetic measurement means (20) rigidly attached to said object (1), at least one component: of the magnetic field and/or, of at least one i-th derivative of the magnetic field, with $n+1 \geq i \geq 1$, $n \geq 1$, at the magnetic measurement means (20); (b) estimating, by the data processing means (21, 31, 41), at least one component of the movement of said object (1) by using at least one component of the equation $\nabla_n B = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n \beta + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, where $\nabla_n B$ is an n-th derivative of the magnetic field, Ω is the instantaneous angular velocity, V the instantaneous linear velocity, and f_n and g_n are predetermined functions.

(57) Abrégé : La présente invention concerne un procédé d'estimation du mouvement d'un objet (1) évoluant dans un champ magnétique ambiant, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend des étapes de : (a) Acquisition par des moyens de mesure magnétique (20) solidaires dudit objet (1) d'au moins une composante : du champ magnétique et/ou, d'au moins une dérivée i-ième du champ magnétique, avec $n + 1 \geq i \geq 1$, $n \geq 1$, au niveau des moyens de mesure magnétique (20); (b) Estimation par les moyens de traitement de données (21, 31, 41) d'au moins une composante du mouvement dudit objet (1) en utilisant au moins une composante de l'équation $\nabla_n B = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n \beta + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n-ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f_n et g_n des fonctions prédéterminées.



WO 2019/012239 A1

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17(iv))*

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

PROCEDE D'ESTIMATION DU MOUVEMENT D'UN OBJET EVOLUANT DANS UN CHAMP MAGNETIQUE

DOMAINE TECHNIQUE GENERAL

5

La présente invention concerne le domaine de la navigation sans GPS.

Plus précisément, elle concerne un procédé d'estimation du mouvement d'un objet par des techniques magnéto-inertielles.

10 ETAT DE L'ART

Les techniques dites de navigation magnéto-inertielles permettent d'estimer précisément la vitesse (et de là la position par intégration) d'un solide dans un lieu où le champ magnétique est perturbé.

15 Précisément, il a été proposé dans le brevet FR2914739 d'utiliser, en complément des équations déjà utilisées en techniques inertielles classiques, l'équation $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$ pour estimer le vecteur vitesse (linéaire) V , à partir du vecteur vitesse angulaire Ω (généralement mesuré par des gyromètres de la centrale inertielle), des mesures de champ magnétique B et de ses dérivées par
20 rapport au temps \dot{B} et de ses dérivées spatiales ∇B (gradient), mesurées ou estimées.

Grâce à cette information sur la vitesse du solide, l'erreur sur l'estimation de position sera dans le pire des cas proportionnelle au temps, contrairement aux techniques inertielles classiques où elle est quadratique en temps.

25 Ces techniques magnéto-inertielles apportent ainsi entière satisfaction, et requièrent des capteurs inertiels de moindre performance que les méthodes inertielles classiques (basées sur l'intégration au travers d'un filtre de Kalman ou d'un autre observateur d'informations en provenance de gyromètres et d'accéléromètres embarqués sur le solide dont on souhaite estimer la position et
30 la vitesse : typiquement, les gyromètres « maintiennent » un repère, dans lequel une double intégration temporelle des mesures des accéléromètres permet d'estimer le mouvement) et donc moins encombrants.

Ainsi, au moins une centrale inertielle est couplée à un ou plusieurs magnétomètres répartis spatialement (typiquement magnétomètres disposés sur les sommets d'un trièdre direct) et solidaire de la centrale inertielle (typiquement placée à l'origine du trièdre). Les données issues de ces capteurs sont transmises
5 à une carte électronique d'acquisition et de calcul qui délivre à l'utilisateur l'information de position et de vitesse par résolution de l'équation susmentionnée. L'utilisation de plusieurs magnétomètres permet de mesurer directement les gradients de champ magnétique par exemple par différence finie (développement de Taylor), au lieu de les estimer.

10 On constate cependant que dans l'équation de navigation magnéto-inertielle, l'information sur la vitesse est faible dans les directions (dites faibles) associées aux valeurs propres faibles (voire nulle) du gradient.

De plus, cette équation n'a que trois composantes, ce qui fait qu'elle n'apporte que trois contraintes sur les vitesses (angulaires Ω et linéaire V).

15 Il serait souhaitable de disposer d'une nouvelle méthode de navigation magnéto-inertielle par mesure du gradient du champ magnétique qui offre une plus grande précision dans toutes les directions, et qui améliore encore les performances.

20 PRESENTATION DE L'INVENTION

La présente invention se rapporte ainsi selon un premier aspect à un procédé d'estimation du mouvement d'un objet évoluant dans un champ magnétique ambiant, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend des
25 étapes de :

(a) Acquisition par des moyens de mesure magnétique solidaires dudit objet d'au moins une composante :

- du champ magnétique et/ou
- d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique, avec $n + 1 \geq$
30 $i \geq 1, n \geq 1,$

au niveau des moyens de mesure magnétique ;

(b) Estimation par les moyens de traitement de données d'au moins une composante du mouvement dudit objet en utilisant au moins une

composante de l'équation $\dot{\nabla}_n B = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n-ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f_n et g_n des fonctions prédéterminées.

- 5 Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives :
- les moyens de mesure magnétique comprennent au moins un gradiomètre, de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par chaque gradiomètre solidaire dudit objet d'une composante d'au moins une dérivée i-ième du champ magnétique au niveau du gradiomètre ;
- 10
- les moyens de mesure magnétique comprennent au moins un magnétomètre, de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par ledit magnétomètre solidaire dudit objet d'une composante du champ magnétique au niveau du magnétomètre ;
 - les moyens de mesure magnétique ne comprennent que des gradiomètres ou que des magnétomètres ;
- 15
- les moyens de mesure magnétique sont constitués d'une pluralité de gradiomètres ou magnétomètres organisés en triaxes, chaque triaxe étant associé à une position spatiale.
 - $i = n$, de sorte que de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par chaque gradiomètre solidaire dudit objet d'une composante de la dérivée n-ième du
- 20
- au moins $4n+8$ composantes de la dérivée n-ième du champ magnétique sont acquises à l'étape (a), et 3^{n+1} composantes de l'équation $\dot{\nabla}_n B = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ sont utilisées à l'étape (b).
 - $n = 1$;
- 25
- est également utilisée à l'étape (b) au moins une composante d'au moins une équation supplémentaire $\dot{\nabla}_k B = f_k(\Omega) \cdot \nabla_k B + g_k(\nabla_{k+1} B) \cdot V$, avec $k \in \llbracket 0 ; n - 1 \rrbracket$;
 - $k = 0, f_0 = skew, g_0 = id$, de sorte que l'équation supplémentaire est $\dot{B} = -\Omega \times B + \nabla B \cdot V$;
 - l'étape (a) comprend en outre l'acquisition par des moyens de mesure
- 30
- inertielle solidaires dudit objet d'au moins une composante de la vitesse angulaire Ω ;

- au moins $(n+2)(n+4)$ composantes du champ magnétique et/ou d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique sont acquises à l'étape (a), et 3^{n+1} composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ sont utilisées à l'étape (b);
- 5
- au moins une relation entre des composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ est déterminée à l'étape (c) par application de la version locale d'au moins une équation de Maxwell sur les composantes de la dérivée n -ième du champ magnétique $\nabla_n B$.
- 10
- Selon un deuxième aspect, l'invention concerne un équipement d'estimation du mouvement d'un objet évoluant dans un champ magnétique ambiant, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de traitement de données configurés pour mettre en œuvre :
- Un module de réception d'au moins une composante :
 - 15
 - du champ magnétique et/ou
 - d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique, avec $n + 1 \geq i \geq 1, n \geq 1,$
 - acquis par des moyens de mesure magnétique solidaires dudit objet ;
 - Un module d'estimation d'au moins une composante du mouvement dudit
 - 20
 - objet en utilisant au moins une composante de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n -ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f_n et g_n des fonctions prédéterminées.
- 25
- Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives :
- L'équipement est un boîtier comprenant les moyens de mesure magnétique ;
 - L'équipement est un terminal mobile ou un serveur, adapté pour communiquer avec un boîtier comprenant les moyens de mesure magnétique.
- 30
- Selon un troisième aspect, l'invention concerne un système comprenant l'équipement selon le deuxième aspect de l'invention et au moins un boîtier en connexion.

Selon un quatrième et un cinquième aspect, l'invention concerne un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé d'estimation du mouvement d'un objet évoluant dans un champ magnétique ambiant selon le premier aspect de l'invention ; et un moyen de
5 stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour l'exécution d'un procédé d'estimation du mouvement d'un objet évoluant dans un champ magnétique ambiant selon le premier aspect de l'invention.

10 PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre d'un mode de réalisation préférentiel. Cette description sera donnée en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- 15 - la figure 1 est un schéma d'équipements pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention ;
- La figure 2 représente plus en détail un exemple de boîtier pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention.

20 DESCRIPTION DETAILLEE

Principe

Le présent procédé propose de travailler non pas sur les variations
25 spatiales et temporelles du champ magnétique évaluées grâce aux mesures de magnétomètres, mais sur les variations spatiales et temporelles des gradients magnétiques (i.e. les variations spatiales du champ magnétique) évaluées en particulier grâce aux mesures de gradiomètres.

En d'autres termes, on considère une équation généralisée de la forme
30 $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, avec $\nabla_n B$ le gradient spatial d'ordre $n \geq 1$ écrit sous la forme d'un vecteur (on comprend que si $n = 0$ alors $\nabla_0 B = B$ et on revient à l'équation connue $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$, et si $n = 1$, $\nabla_1 B$ est le gradient classique).

f_n et g_n sont alors des fonctions matricielles prédéterminées qui ne dépendent que de n et des hypothèses prises sur les gradients (voir ci-après).

On note que $\nabla_n B$ et donc l'équation généralisée a 3^{n+1} composantes, et ainsi amène un plus grand nombre de contraintes sur les vitesses (angulaires Ω et linéaire V), en pratique $2n + 3$ au vu des propriétés du champ magnétique (équations de Maxwell), voir plus loin.

De plus, ces composantes supplémentaires permettent d'apporter de l'information dans les directions dites faibles correspondant aux valeurs propres faibles (voire nulle) du gradient.

De façon avantageuse, est également considérée au moins une (et de façon préférée chaque) autre équation de la forme $\nabla_k \dot{B} = f_k(\Omega) \cdot \nabla_k B + g_k(\nabla_{k+1} B) \cdot V$, avec une ou plusieurs valeurs de $k \in \llbracket 0 ; n - 1 \rrbracket$ (par exemple k peut être égal à zéro, ce qui signifie qu'on peut également considérer l'équation d'origine $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$).

On note que l'on peut travailler avec un gradient représenté dans le référentiel terrestre ou dans le référentiel lié à l'objet 1 dont on estime le mouvement, et le cas échéant, la fonction g comprend des produits de $\nabla_{k+1} B$ par R et R^T (i.e. $R(\nabla_{k+1} B)R^T$), où R est la matrice de passage du référentiel terrestre au référentiel lié à l'objet 1,

Par ailleurs, dans la suite de la présente description, on détaillera plus précisément l'exemple préféré où $n = 1$.

De façon encore plus préférée, on utilisera $n = 1$ et un unique $k = 0$, i.e. le système de deux équations :

$$\begin{cases} \nabla B = f_1(\Omega) \cdot \nabla B + g_1(\nabla_2 B) \cdot V \\ \dot{B} = f_0(\Omega) \cdot B + g_0(\nabla B) \cdot V = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V \end{cases}$$

Les fonctions f_n et g_n peuvent être calculées par l'homme du métier en dérivant itérativement l'équation $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$. On voit que si $n = 0$, on a

$$f_0 \left(\Omega = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \right) = skew(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \text{ et } g_0 = id = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \text{ « skew » est la}$$

fonction qui détermine la matrice antisymétrique associée au produit vectoriel par un vecteur. Les fonctions f_n et g_n seront par exemple explicitées plus loin pour $n = 1$.

Architecture

En référence à la **figure 1**, le présent procédé permet l'estimation du mouvement d'un objet 1 évoluant dans un champ magnétique ambiant (typiquement le champ magnétique terrestre, le cas échéant légèrement altéré par les objets métalliques ou des courants électriques à proximité), noté \vec{B} . Comme déjà expliqué, le champ magnétique est un champ vectoriel en l'espèce tridimensionnel, c'est-à-dire associant un vecteur de dimension trois à chaque point de tridimensionnel dans lequel l'objet est mobile.

Cet objet 1 peut être n'importe quel objet mobile dont la connaissance de la position est souhaitée, par exemple un véhicule à roues, un drone, etc., mais également une personne ou une partie du corps de cette personne (ses mains, sa tête, etc.).

L'objet 1 est équipé de moyens de mesure magnétiques 20, mais préférentiellement ces derniers ne sont pas des magnétomètres mais des gradiomètres magnétiques comme expliqué. Plus précisément, au lieu de mesurer la valeur des composantes du champ magnétique \vec{B} ces derniers mesurent directement la valeur des composantes du gradient du champ magnétique \vec{B} , i.e. la valeur des dérivées spatiales. De tels gradiomètres magnétiques 20 sont connus de l'homme du métier. Selon certains modes de réalisation de l'invention, on pourra utiliser des gradiomètres mesurant directement la valeur des dérivées secondes (gradient d'ordre deux), et de façon générale des dérivées i -ièmes (gradient d'ordre i), $n + 1 \geq i \geq 1$. Avantageusement, $i = n$, c'est-à-dire que sont directement mesurées les dérivées spatiales de tous les termes des équations utilisées, mais on comprendra que l'invention n'est pas limitée à ce mode de réalisation, en particulier si plusieurs équations avec $k < n$ sont considérées. A noter qu'on peut avoir $i = n + 1$, c'est-à-dire qu'on mesure directement des composantes de $\nabla_{n+1}B$. Dans la suite de la présente description, on prendra l'exemple où $i \in \{n; n + 1\}$, et donc on considèrera des gradiomètres plutôt que des magnétomètres, mais l'homme du métier saura transposer.

On comprendra néanmoins que le présent procédé peut utiliser toute combinaison de magnétomètres et/ou de gradiomètres : soit il n'utilise que des valeurs « simple » du champ magnétique à partir desquelles les valeurs des

dérivées sont recalculées, ce qui signifie que les moyens de mesure magnétiques ne sont que des magnétomètres (i.e. virtuellement $i = 0$) ; soit il n'utilise aucune valeur « simple » du champ magnétique (et uniquement des dérivées à un ou plusieurs ordres donnés), ce qui signifie qu'aucun magnétomètre standard n'est
5 requis ; soit il utilise également les valeurs du champ magnétique (et non plus uniquement des dérivées), et le système peut comprendre à la fois des gradiomètres et des magnétomètres standards.

Les gradiomètres 20 sont solidaires de l'objet 1, i.e. ils présentent un
10 mouvement sensiblement identique dans le référentiel terrestre. De façon préférée, le référentiel de l'objet 1 est muni d'un repère cartésien orthonormé dans lequel les coordonnées sont notées (x_1, x_2, x_3) , les gradiomètres 20 présentent ainsi une position prédéterminée dans ce repère.

Les gradiomètres 20 sont préférentiellement ceux d'un boîtier 2 tel que
15 représenté sur la **figure 2** présentant (par exemple si l'objet 1 est une personne) des moyens 23 d'attache à l'objet 1 (par exemple le poignet ou la main). Ces moyens d'attache 23 consistent par exemple en un bracelet par exemple à bande auto-agrippante qui enserre le membre et permet la liaison solidaire. On comprendra bien que l'invention n'est pas limitée à l'estimation du mouvement
20 d'une personne, mais elle est particulièrement avantageuse dans une telle utilisation car elle permet un encombrement très réduit, ce qui est nécessaire pour que le boîtier soit portable par un humain de façon ergonomique.

Le ou les gradiomètres 20 sont « axiaux », c'est à dire capables de mesurer
une composante d'une dérivée spatiale d'ordre i dudit champ magnétique, i.e. la
25 variation d'une composante de $\nabla_{i-1}B$ au niveau dudit gradiomètres 20 selon leur axe (ou en cas de magnétomètres, i.e. $i=0$, une composante dudit champ magnétique, i.e. la projection dudit vecteur champ magnétique \vec{B} selon leur axe).

Comme expliqué avant $\nabla_i B$ présente $3^{(i+1)}$ composantes, mais il n'est pas
nécessaire d'acquérir toutes ces composantes et $2i+3$ suffisent, comme l'on verra
30 plus loin.

Avantageusement les gradiomètres 20 d'ordre i sont ainsi au moins au nombre de $3i+3$, de sorte à pouvoir avantageusement les organiser par groupes de trois en « triaxes », i.e. un triplet de gradiomètres 20 deux à deux orthogonaux

associés à la même position spatiale et mesurant la variation selon les trois axes d'une même composante de $\nabla_{i-1}B$, de sorte à pouvoir déterminer toutes les composantes de ∇_iB .

Les composantes de $\nabla_{i+1}B$ peuvent ensuite si nécessaire se déterminer en acquérant les composantes de ∇_iB en plusieurs positions spatiales et en calculant les variations spatiales, et ainsi de suite. $2i+3+2(i+1)+3=4i+8$ gradiomètres 20 d'ordre i suffisent pour calculer toutes les composantes de $\nabla_{i+1}B$, $6i+13$ gradiomètres 20 d'ordre i suffisent pour calculer toutes les composantes de $\nabla_{i+2}B$, etc. (voir plus loin).

10 De façon préférée, le repère orthonormé associé à l'objet est choisi par convention (et par facilité pour la suite de la présente description) tel que les triaxes sont avantageusement orientés conformément audit repère orthonormé, de sorte à faciliter encore les calculs.

Mais l'homme du métier saura dans tous les cas transposer à n'importe 15 quelle disposition spatiale de gradiomètres/magnétomètres.

Dans le cas préféré où $n = 1$ et $k = 0$, et on considère le système de deux équations $\begin{cases} \dot{\nabla}B = f_1(\Omega) \cdot \nabla B + g_1(\nabla_2 B) \cdot V \\ \dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V \end{cases}$, alors on utilise de façon très avantageuse un seul triplet de magnétomètres ($i = 0$) et le reste en gradiomètres mesurant le gradient spatial au premier ou deuxième ordre ($i \in \{1; 2\}$), de sorte à pouvoir 20 déterminer facilement toutes les composantes des deux équations.

Le boîtier 2 peut comprendre des moyens de traitement 21 (typiquement un processeur) pour la mise en œuvre directement en temps réel des traitements du présent procédé, ou bien les mesures peuvent être émises via des moyens de 25 communication 25 vers un dispositif externe tel qu'un terminal mobile (smartphone) 3, voire un serveur distant 4, ou encore les mesures peuvent être enregistrées dans des moyens de stockage de données 22 locaux (une mémoire par exemple de type flash) mémoire locale pour un traitement a posteriori par exemple sur le serveur 4.

30 Les moyens de communication 25 peuvent mettre en œuvre une communication sans fil à courte portée par exemple Bluetooth ou Wifi (en particulier dans un mode de réalisation avec un terminal mobile 3) voire être des

moyens de connexion à un réseau mobile (typiquement UMTS/LTE) pour une communication à longue distance. Il est à noter que les moyens de communication 25 peuvent être par exemple une connectique filaire (typiquement USB) pour transférer les données des moyens de stockage de données 22 locaux à ceux d'un terminal mobile 3 ou d'un serveur 4.

Si c'est un terminal mobile 3 (respectivement un serveur 4) qui héberge « l'intelligence », il comprend des moyens de traitement 31 (respectivement 41) tels qu'un processeur pour la mise en œuvre des traitements du présent procédé qui vont être décrits. Lorsque les moyens de traitement utilisés sont ceux 21 du boîtier 2, celui-ci peut encore inclure des moyens de communication 25 pour transmettre la position estimée. Par exemple la position du porteur peut être envoyée au terminal mobile 3 pour afficher la position dans une interface d'un logiciel de navigation.

Dans la suite de la présente description, on verra que les moyens de traitement de données 21, 31, 41 respectivement du boîtier 2, d'un smartphone 3 et d'un serveur distant 4 peuvent indifféremment et selon les applications réaliser tout ou partie des étapes du procédé.

Procédé

20

Dans une première étape (a), le procédé comprend l'acquisition (en particulier dans un référentiel de l'objet 1) par le ou les gradiomètres/magnétomètres 20 solidaires dudit objet 1, d'au moins une composante :

- 25 - du champ magnétique et/ou
- d'au moins une dérivée i -ième dudit champ magnétique \vec{B} , avec une ou plusieurs valeurs $i \in \llbracket 1 ; n + 1 \rrbracket$.

Comme expliqué, divers gradiomètres/magnétomètres peuvent être utilisés de sorte à mesurer divers ordres des dérivées ou directement les valeurs du champ magnétique.

30

L'étape (a) peut également comprendre l'acquisition par les moyens de mesure inertielle 24 d'au moins une composante de la vitesse

angulaire Ω , voire par d'autres moyens de mesure d'au moins une composante de la vitesse linéaire V .

Ces grandeurs sont avantageusement mesurées avec un échantillonnage dt (i.e. toutes les « dt » secondes) avec dt très petit devant le temps caractéristique des mouvements de l'objet 1, typiquement 40 ms.

Comme l'on verra plus loin, le nombre minimal de composantes du champ magnétique et/ou d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique à acquérir pour garantir un système entièrement déterminé est $4n+8$ (en l'espèce $4n+8$ composantes de la dérivée n -ième du champ magnétique, ou alternativement
10 $2n+3$ composantes de la dérivée n -ième du champ magnétique et $2n+5$ composantes de la dérivée $n+1$ -ième du champ magnétique), correspondant au nombre de composantes indépendantes de $\nabla_n B$ ($2n+3$) et $\nabla_{n+1} B$ ($2(n+1)+3$).

De façon générale, le nombre minimal de composantes de la dérivée i -ième (et/ou d'une dérivée d'ordre supérieur) du champ magnétique à acquérir pour garantir un système entièrement déterminé est donnée par la formule $\sum_{p=i}^{n+1} (2p + 3)$, c'est-à-dire $(n - i + 2)(n + i + 4)$, car il est nécessaire de déterminer toutes les composantes indépendantes de $\nabla_i B$ puis $\nabla_{i+1} B, \dots, \nabla_{n+1} B$. Dans le cas extrême $i=0$ (on a au moins 3 magnétomètres, voire uniquement des magnétomètres), ce nombre est $(n + 2)(n + 4)$. En d'autres termes, $(n + 2)(n + 4)$ acquisitions de
20 composantes du champ magnétique et/ou d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique (i.e. de composantes magnétiques à n'importe quel ordre) garantit dans un système entièrement déterminé.

On note qu'avec ce dernier nombre $(n + 2)(n + 4)$ d'acquisitions de composantes magnétiques, toutes les équations de la forme $\nabla_k \dot{B} = f_k(\Omega) \cdot \nabla_k B + g_k(\nabla_{k+1} B) \cdot V$, i.e. $\forall k \in \llbracket 0 ; n - 1 \rrbracket$, y compris l'équation d'origine $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$, peuvent être entièrement déterminées.

On notera qu'il est cependant tout à fait possible que moins de composantes, voire même une seule, soient acquises, si suffisamment de composantes de vitesse sont par ailleurs acquises.

Il est même possible que le système soit sous-déterminé si on prend une seule mesure (i.e. une occurrence de l'étape (a), correspondant à un seul pas de temps), tout en restant déterminé si on prend un ensemble de mesures

correspondant à un intervalle temporel. Toute la théorie des observateurs dynamiques repose sur ce principe, c'est la notion d'observabilité. Il y a même des outils simples en linéaire (critère de Kalman) qui permettent de savoir si un système est observable ou non, i.e. si avec un ensemble Y de mesures partielles d'un état X ($Y = CX$), on peut remonter à l'état sachant qu'il vérifie une équation différentielle du type $dX/dt=A.X$.

Dans une étape (b), les moyens de traitement de données 21, 31, 41 estiment au moins une composante du mouvement de l'objet 1, en particulier toutes les composantes de la vitesse linéaire V . Une ou plusieurs composantes du vecteur vitesse angulaire Ω peuvent être également estimées ou du tout du moins vérifiées (ce qui est également possible pour d'éventuelles composantes acquises de la vitesse linéaire V) si suffisamment de composantes de ladite équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ sont disponibles.

Pour cela, on utilisera comme expliqué, en complément des équations déjà utilisées en techniques inertielles classiques et éventuellement d'une ou plusieurs composantes de l'équation connue $\dot{B} = -\Omega \times B + \nabla B \cdot V$, une ou plusieurs composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ pour estimer le vecteur vitesse V , à partir des valeurs de dérivée d'ordre n de champ magnétique $\nabla_n B$ (soit directement mesurées, soit calculées à partir de valeurs mesurées de dérivées d'ordre i inférieur) et de ses dérivées par rapport au temps $\nabla_n \dot{B}$ et de son gradient $\nabla_{n+1} B$ (dont les composantes sont soit également directement mesurées ($i = n + 1$), soit calculées à partir de valeurs mesurées de dérivées d'ordre i inférieur).

On note que $\nabla_n \dot{B}$ s'obtient facilement à partir des valeurs de $\nabla_n B$ connaissant le pas de temps entre deux mesures. Alternativement, on utilise les techniques de filtrage/estimation type Kalman ou observateurs qui permettent de se passer de cette dérivation.

Bien que $\nabla_n B$ présente comme expliqué 3^{n+1} composantes qui sont avantageusement toutes utilisées à l'étape (b), en pratique seules $2n+3$ composantes sont indépendantes.

L'idée astucieuse est d'appliquer la version locale d'au moins une équation de Maxwell de sorte à déterminer au moins une relation entre les composantes du gradient d'ordre $n \nabla_n B$, avantageusement au moins la version locale de l'équation de Maxwell-Thomson et avantageusement également la version locale de l'équation de Maxwell-Ampère. Le champ magnétique est ainsi à rotationnel nul et/ou à divergence nulle.

L'homme du métier pourra consulter à cet effet la demande FR1653493.

Exemple si $n=1$

10

On pose $BY_x = \frac{\partial BY}{\partial x}$ la dérivée par rapport à x de la composante y du champ magnétique. On peut écrire toutes les autres dérivées premières en suivant la même logique.

On pose $BY_{xz} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial BY}{\partial x}$ la dérivée par rapport à z de la dérivée par rapport à x de la composante y du champ magnétique. On peut écrire toutes les autres dérivées secondes en suivant la même logique.

Alors, on obtient le modèle suivant (toutes les équations sont écrites dans le repère de l'objet 1):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(BX_x) &= rBY_x + rBX_y - qBZ_x - qBX_z + BX_{xx}u + BX_{xy}v + BX_{xz}w \\ \frac{d}{dt}(BX_y) &= rBY_y - rBX_x - qBZ_y + pBX_z + BX_{yx}u + BX_{yy}v + BX_{yz}w \\ \frac{d}{dt}(BX_z) &= +rBY_z + qBX_x - qBZ_z - pBX_y + BX_{zx}u + BX_{zy}v + BX_{zz}w \\ \frac{d}{dt}(BY_x) &= -rBX_x + pBZ_x + rBY_y - qBY_z + BY_{xx}u + BY_{xy}v + BY_{xz}w \\ \frac{d}{dt}(BY_y) &= -rBX_y + pBY_z - rBY_x + pBZ_y + BY_{yx}u + BY_{yy}v + BY_{yz}w \\ \frac{d}{dt}(BY_z) &= -rBX_z + pBZ_z - pBY_y + qBY_x + BY_{zx}u + BY_{zy}v + BY_{zz}w \\ \frac{d}{dt}(BZ_x) &= +qBX_x - pBY_x + rBZ_y + qBZ_z + BZ_{xx}u + BZ_{xy}v + BZ_{xz}w \\ \frac{d}{dt}(BZ_y) &= +qBX_y - pBY_y - rBZ_x + pBZ_z + BZ_{yx}u + BZ_{yy}v + BZ_{yz}w \\ \frac{d}{dt}(BZ_z) &= +qBX_z - pBY_z + qBZ_x - pBZ_y + BZ_{zx}u + BZ_{zy}v + BZ_{zz}w \end{aligned}$$

Où $\Omega = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$ est la vitesse angulaire de l'objet et $V = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$ est sa vitesse

linéaire.

Les différents coefficients sur chacun des termes de ces équations définissent les matrices permettant d'exprimer f_1 et g_1 .

5

$$\text{Par exemple, } f_1(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & r & -q & r & 0 & 0 & -q & 0 & 0 \\ -r & 0 & p & 0 & r & 0 & 0 & -q & 0 \\ q & -p & 0 & 0 & 0 & r & 0 & 0 & -q \\ -r & 0 & 0 & 0 & r & -q & p & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & -r & 0 & -p & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & -r & q & -p & 0 & 0 & 0 & -p \\ q & 0 & 0 & -p & 0 & 0 & 0 & r & -q \\ 0 & q & 0 & 0 & -p & 0 & -r & 0 & p \\ 0 & 0 & q & 0 & 0 & -p & q & -p & 0 \end{bmatrix}$$

On voit donc qu'on a neuf composantes de l'équation $\nabla \dot{B} = f_1(\Omega) \cdot \nabla B + g_1(\nabla_2 B) \cdot V$, qu'on peut utiliser de manière indépendante pour lier les composantes de Ω et de V , soit six de plus qu'avec l'équation $\dot{B} = -\Omega \wedge B + \nabla B \cdot V$ seule.

10

Comme expliqué précédemment, le nombre de composantes indépendantes du gradient (∇B) peut être réduit de 9 jusqu'à 5 en fonction des hypothèses et de la hessienne ($\nabla_2 B$) de 27 jusqu'à 7 selon les hypothèses, c'est-à-dire que l'acquisition de 12 composantes de dérivée première ou 15 composantes du champ magnétique suffit.

15

Pour revenir à l'exemple ci-avant, dans le cas où on considère que le champ magnétique est à divergence et rotationnel nul, on n'a que 5 composantes indépendantes pour le gradient à mesurer (on choisit les 5 ci-dessous) et 7 pour la Hessienne (on choisit BX_{xx} , BX_{xy} , B_{xxz} , B_{xyy} , B_{xyz} , B_{yyy} , B_{yyz}), alors on obtient les équations simplifiées suivantes (les termes entre crochets sont calculés via les relations $\text{div } \vec{B} = 0$ et $\text{rot } \vec{B} = \vec{0}$), les autres termes sont identiques au système à 9

20

composantes.

$$\frac{d}{dt}(BX_x) = r[BX_y] + rBX_y - q[BX_z] - qBX_z + BX_{xxu} + BX_{xyv} + BX_{xzw}$$

$$\frac{d}{dt}(BX_y) = rBY_y - rBX_x - q[BY_z] + pBX_z + [BX_{xy}]u + BX_{yyv} + BX_{yzw}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(BXz) &= +rBYz + qBXx - q[-BXx - BYy] - pBXY + [BXxz]u + [BXYz]v \\ &\quad + [-BXyy - BXxx]w \\ \frac{d}{dt}(BYy) &= -rBXY + pBYz - r[BXY] + p[BYz] + [BXyy]u + BYyyv + BYyzw \\ \frac{d}{dt}(BYz) &= -rBXz + p[-BXx - BYy] - pBYy + q[BXY] + [BXYz]u + [BYyz]v \\ &\quad + [-BXxy - BYyy]w \end{aligned}$$

Equipements et système

Selon un deuxième aspect, l'invention concerne en particulier les
 5 équipements 2, 3, 4 pour la mise en œuvre de l'un ou l'autre des modes de
 réalisation du procédé.

Comme expliqué précédemment, selon un premier mode de réalisation
 l'équipement est un boîtier 2 autonome comprenant les
 magnétomètres/gradiomètres 20 et les moyens de traitement de données 21
 10 configurés pour la mise en œuvre des étapes du procédé.

Le boîtier 2 comprend en outre des moyens d'attache 23 du boîtier 2, et le
 cas échéant des moyens de mesure inertielle 24 additionnels, des moyens de
 stockage de données 22 (pour le stockage par exemple des mouvements estimés)
 et/ou des moyens de communication 25 pour l'exportation des résultats.

15 Selon un deuxième mode de réalisation, l'équipement est un terminal
 mobile 3 ou un serveur 4, adapté pour communiquer avec un boîtier 2 comprenant
 les moyens de mesure inertielle 24. En d'autres termes, le terminal 3 ou le serveur
 4 comprend les moyens de traitement 31 ou 41 configurés pour la mise en œuvre
 des étapes du procédé. Chaque boîtier 2 peut tout de même comprendre des
 20 moyens de traitement de données 21 pour le contrôle des moyens 20, 24 et la
 transmission (via des moyens de communication 25) des données mesurées aux
 moyens de traitement de données 31, 41.

Il est à noter que les moyens 21, 31, 41 peuvent le cas échéant se partager
 des étapes du procédé.

L'invention concerne dans ce cas également le système comprenant l'équipement 3, 4 selon ce mode de réalisation et le ou les boîtiers 2 « satellites » en connexion.

Dans tous les cas, les moyens de traitement de données 21, 31, 41 de l'équipement 2, 3, 4 « principal » sont configurés pour mettre en œuvre :

- Un module de réception d'au moins une (en particulier au moins $2n+3$) composante :

- du champ magnétique (si $n=0$) et/ou
- d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique, avec $n + 1 \geq$

10 $i \geq 1$ et $n \geq 1$,

acquis par des moyens de mesure magnétique 20 solidaires dudit objet 1 ;

- Un module d'estimation d'au moins une composante du mouvement dudit objet 1 en utilisant au moins une composante (préférentiellement 3^{n+1}) de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n -ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f et g des fonctions prédéterminées (ainsi qu'éventuellement une ou plusieurs équations $\nabla_k \dot{B} = f_k(\Omega) \cdot \nabla_k B + g_k(\nabla_{k+1} B) \cdot V$, $k \in \llbracket 0; n - 1 \rrbracket$, et des équations inertielles classiques).

20 *Produit programme d'ordinateur*

Selon un troisième et un quatrième aspects, l'invention concerne un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution (sur les moyens de traitement 21, 31, 41) d'un procédé d'estimation du mouvement d'un objet 1 évoluant dans un champ magnétique ambiant selon le premier aspect de l'invention, ainsi que des moyens de stockage lisibles par un équipement informatique (par exemple des moyens de stockage de données 22) sur lequel on trouve ce produit programme d'ordinateur.

REVENDEICATIONS

5 1. Procédé d'estimation du mouvement d'un objet (1) évoluant dans un champ magnétique ambiant, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend des étapes de :

(a) Acquisition par des moyens de mesure magnétique (20) solidaires dudit objet (1) d'au moins une composante :

- du champ magnétique et/ou
- 10 ○ d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique, avec $n + 1 \geq i \geq 1$ et $n \geq 1$,

au niveau des moyens de mesure magnétique (20) ;

(b) Estimation par les moyens de traitement de données (21, 31, 41) d'au moins une composante du mouvement dudit objet (1) en utilisant au moins
15 une composante de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n -ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f_n et g_n des fonctions prédéterminées.

20 2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les moyens de mesure magnétique (20) comprennent au moins un gradiomètre, de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par chaque gradiomètre solidaire dudit objet (1) d'une composante d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique au niveau du gradiomètre.

25

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel les moyens de mesure magnétique (20) comprennent au moins un magnétomètre, de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par ledit magnétomètre solidaire dudit objet (1) d'une composante du champ magnétique au niveau du magnétomètre.

30

4. Procédé selon l'une des revendications 2 ou 3, dans lequel les moyens de mesure magnétique (20) ne comprennent que des gradiomètres ou que des magnétomètres.

5 **5.** Procédé selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel les moyens de mesure magnétique (20) sont constitués d'une pluralité de gradiomètres ou magnétomètres organisés en triaxes, chaque triaxe étant associé à une position spatiale.

10 **6.** Procédé selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel $i \in \{n; n + 1\}$, de sorte que de sorte que l'étape (a) comprend l'acquisition par chaque gradiomètre solidaire dudit objet (1) d'une composante de la dérivée n-ième du champ magnétique au niveau du gradiomètre.

15 **7.** Procédé selon la revendication 6, dans lequel au moins $4n+8$ composantes de la dérivée n-ième du champ magnétique sont acquises à l'étape (a), et 3^{n+1} composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ sont utilisées à l'étape (b).

20 **8.** Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel au moins $(n+2)(n+4)$ composantes du champ magnétique et/ou d'au moins une dérivée i-ième du champ magnétique sont acquises à l'étape (a), et 3^{n+1} composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ sont utilisées à l'étape (b).

25 **9.** Procédé selon l'une des revendication 7 et 8, dans lequel au moins une relation entre des composantes de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$ est déterminée à l'étape (b) par application de la version locale d'au moins une équation de Maxwell sur les composantes de la dérivée n-ième du champ magnétique $\nabla_n B$.

30 **10.** Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel $n = 1$.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel est également utilisée à l'étape (b) au moins une composante d'au moins une équation supplémentaire $\nabla_k \dot{B} = f_k(\Omega) \cdot \nabla_k B + g_n(\nabla_{k+1} B) \cdot V$, avec $k \in \llbracket 0; n-1 \rrbracket$.

5 12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel $k = 0$, $f_0 = skew$, $g_0 = id$ de sorte que l'équation supplémentaire est $\dot{B} = -\Omega \times B + \nabla B \cdot V$.

10 13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel l'étape (a) comprend en outre l'acquisition par des moyens de mesure inertielle (24) solidaires dudit objet (1) d'au moins une composante de la vitesse angulaire Ω .

15 14. Equipement (2, 3, 4) d'estimation du mouvement d'un objet (1) évoluant dans un champ magnétique ambiant, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de traitement de données (21, 31, 41) configurés pour mettre en œuvre :

- la réception d'au moins une composante :
 - o du champ magnétique et/ou
 - o d'au moins une dérivée i -ième du champ magnétique, avec $n+1 \geq i \geq 1$ et $n \geq 1$,

20 acquise par des moyens de mesure magnétique (20) solidaires dudit objet (1) ;

- l'estimation d'au moins une composante du mouvement dudit objet (1) en utilisant au moins une composante de l'équation $\nabla_n \dot{B} = f_n(\Omega) \cdot \nabla_n B + g_n(\nabla_{n+1} B) \cdot V$, où $\nabla_n B$ est une dérivée n -ième du champ magnétique, Ω la vitesse angulaire instantanée, V la vitesse linéaire instantanée, et f_n et g_n des fonctions prédéterminées.

30 15. Equipement selon la revendication 14, étant un boîtier (2) comprenant les moyens de mesure magnétique (20).

16. Equipement selon la revendication 14, étant un terminal mobile (3) ou un serveur (4), adapté pour communiquer avec un boîtier (2) comprenant les moyens de mesure magnétique (20).

5 **17.** Système comprenant l'équipement (3, 4) selon la revendication 16 et au moins un boîtier (2) en connexion.

18. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé d'estimation du mouvement d'un objet (1) évoluant dans un champ magnétique ambiant selon l'une des revendications 1
10 à 13, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

19. Moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour
15 l'exécution d'un procédé d'estimation du mouvement d'un objet (1) évoluant dans un champ magnétique ambiant selon l'une des revendications 1 à 13.

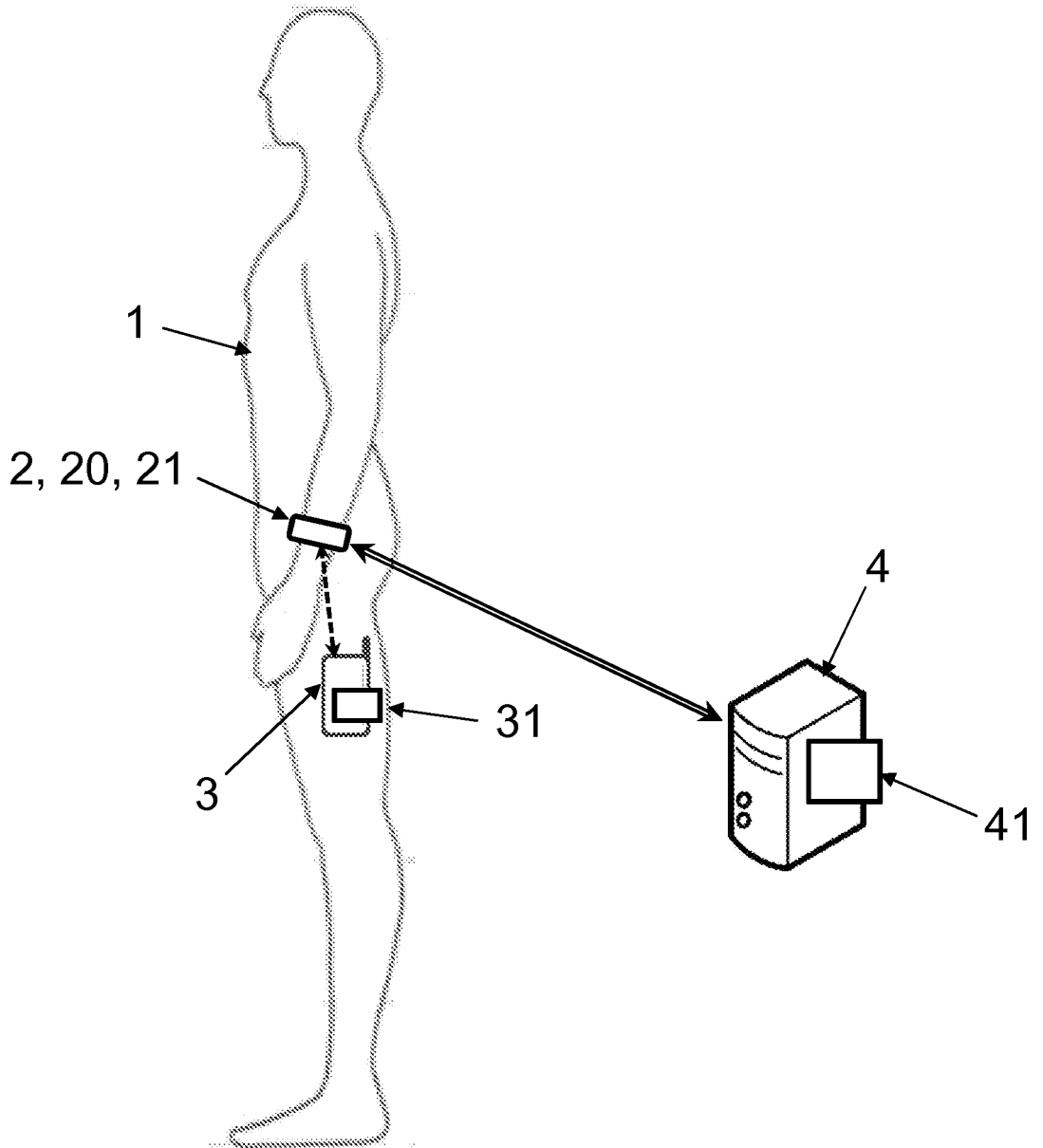


FIG. 1

2/2

2 ↘

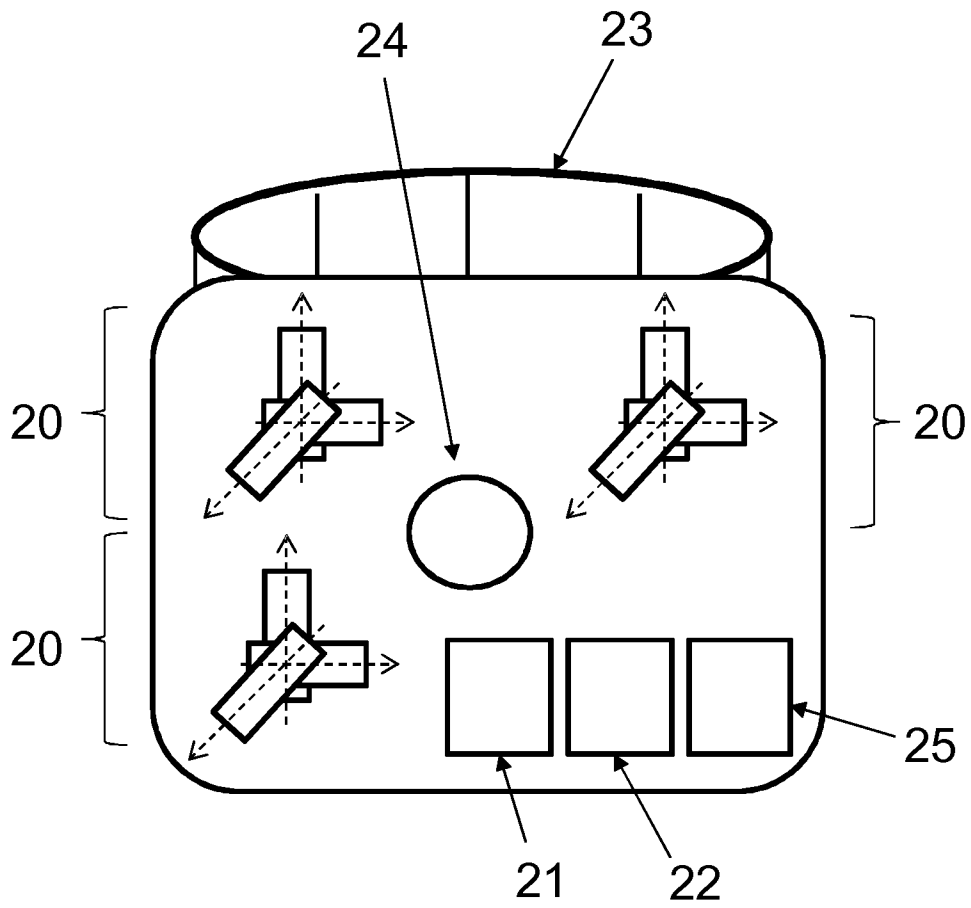


FIG. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/051783

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01C21/16
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 2 541 199 A1 (CENTRE NAT ETD SPATIALES [FR]) 2 January 2013 (2013-01-02)	1,3-15, 18,19
Y	paragraphs [0006] - [0008], [0027], [0040] - [0042]	2,16,17
Y	----- US 2017/074660 A1 (GANN MATTHEW E [US] ET AL) 16 March 2017 (2017-03-16) paragraphs [0027] - [0028]; figure 1 -----	2,16,17

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 23 October 2018	Date of mailing of the international search report 31/10/2018
---	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Pascheka, Patrick
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2018/051783

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
EP 2541199	A1	02-01-2013	EP 2541199 A1	02-01-2013
			FR 2977313 A1	04-01-2013

US 2017074660	A1	16-03-2017	EP 3350543 A1	25-07-2018
			US 2017074660 A1	16-03-2017
			WO 2017048999 A1	23-03-2017

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2018/051783

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01C21/16 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE		
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01C		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	EP 2 541 199 A1 (CENTRE NAT ETD SPATIALES [FR]) 2 janvier 2013 (2013-01-02)	1,3-15, 18,19
Y	alinéas [0006] - [0008], [0027], [0040] - [0042]	2,16,17
Y	US 2017/074660 A1 (GANN MATTHEW E [US] ET AL) 16 mars 2017 (2017-03-16) alinéas [0027] - [0028]; figure 1	2,16,17
<input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 23 octobre 2018		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 31/10/2018
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Pascheka, Patrick

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2018/051783

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 2541199	A1	02-01-2013	EP 2541199 A1	02-01-2013
			FR 2977313 A1	04-01-2013

US 2017074660	A1	16-03-2017	EP 3350543 A1	25-07-2018
			US 2017074660 A1	16-03-2017
			WO 2017048999 A1	23-03-2017
