



- (51) Classification internationale des brevets :
G01C 17/38 (2006.01) *G01C 21/16* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2012/060792
- (22) Date de dépôt international :
7 juin 2012 (07.06.2012)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1154915 7 juin 2011 (07.06.2011) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **MO-VEA** [FR/FR]; 4, avenue du Doyen Louis Weil, Le Pulsar - 5è étage, F-38000 Grenoble (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **FLAMENT, Yanis** [FR/FR]; Le Tracou, F-38134 Saint Julien De Ratz (FR). **CARITU, Yanis** [FR/FR]; La Cote, F-38134 Saint

Joseph La Riviere (FR). **AUJAY, Grégoire** [FR/FR]; 7, rue Marcel Porte, F-38100 Grenoble (FR).

(74) Mandataire : **NGUYEN-VAN-YEN, Christian**; Marks & Clerk France, Immeuble "Visium", 22, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil (FR).

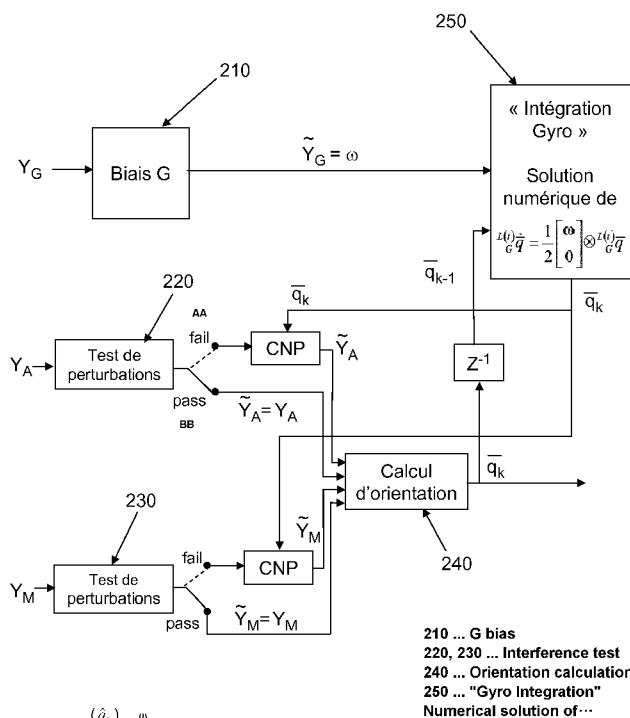
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING THE ORIENTATION OF AN OBJECT, AND ATTITUDE SENSOR IMPLEMENTING SUCH A METHOD

(54) Titre : PROCÉDE D'ESTIMATION SIMPLIFIÉ DE L'ORIENTATION D'UN OBJET ET CENTRALE D'ATTITUDE METTANT EN ŒUVRE UN TEL PROCÉDE



$$(\hat{q}_k) \quad \text{or} \quad (\tilde{Y}_{A,k}, \tilde{Y}_{M,k}, \tilde{Y}_{G,k}) \quad \text{or}$$

FIG.2

(57) Abstract : The invention relates to a method for estimating the orientation of an object in space at a moment k using measurements of the total acceleration (y_A), of the magnetic field (y_M), and of the rotational speed (y_G) of said object on the three spatial axes, comprising a step of preprocessing (210, 220, 230) said measurements (y_A, y_M, y_G) at a moment k so as to detect the existence of an interference in said measurements, and calculate corrected measurements at the moment k, and a step of estimating the orientation (formula I) at the moment k by an observer from the corrected measurements (formula II) at the moment k from the preprocessing step. The estimation step advantageously includes the use of matrices for transforming the object frame of reference into a fixed frame, said matrices being applied, in the event of an interference, to a quaternion deduced from the integration of a rotational-speed measurement made with an orientation quaternion calculated at the moment k-1.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

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

Procédé d'estimation de l'orientation d'un objet dans l'espace à l'instant k utilisant les mesures de l'accélération totale (y_A), de champ magnétique (y_M) et de la vitesse de rotation (y_G) dudit objet selon trois axes de l'espace, comportant une étape de prétraitement (210, 220, 230) desdites mesures (y_A, y_M, y_G) à un instant k pour détecter l'existence d'une perturbation dans lesdites mesures et calculer des mesures corrigées à l'instant k et une étape d'estimation de l'orientation (Formula I) à l'instant k par un observateur à partir des mesures corrigées (Formula II) à l'instant k issues de l'étape de prétraitement. L'étape d'estimation comprend l'avantageusement l'utilisation de matrices de transformation du repère de l'objet dans un repère fixe appliquées, en cas de perturbation, à un quaternion déduit de l'intégration d'une mesure de vitesse de rotation composée avec un quaternion d'orientation calculé à l'instant $k-1$.

PROCÉDÉ D'ESTIMATION SIMPLIFIÉ DE L'ORIENTATION D'UN OBJET ET CENTRALE D'ATTITUDE METTANT EN ŒUVRE UN TEL PROCÉDÉ

La présente invention se rapporte à un procédé d'estimation de l'orientation d'un objet dans l'espace, animé ou non d'une accélération propre et soumis ou non à une perturbation magnétique (variations inconnues autour d'un champ principalement uniforme dans l'environnement proche et constant dans le temps), et à un dispositif mettant en œuvre un tel procédé.

L'estimation de l'orientation permet de résoudre toute une classe de problèmes.

L'obtention de l'orientation nécessite généralement la mise en œuvre de plusieurs modalités de capteurs, faisant partie d'un ensemble désigné par dispositif de capture de mouvement, également désigné par centrale d'attitude.

Des capteurs MEMS (« Micro-Electro-Mechanical Systems » ou microsystèmes électromécaniques) peuvent être utilisés pour constituer cette centrale, ceux-ci présentent l'avantage d'être peu encombrants et de coût réduit. Le capteur offrant une telle combinaison de capteurs MEMS est souvent désigné sous le nom de centrale inertielle ou IMU en anglais (Inertial Measurement Unit). Une centrale d'attitude est une centrale inertielle augmentée des moyens de traitement nécessaires pour obtenir l'orientation. L'emploi de tels capteurs MEMS permet d'envisager l'utilisation de centrales d'attitude dans des domaines d'applications variés, notamment le domaine biomédical, pour la surveillance des personnes âgées à domicile, la rééducation fonctionnelle, dans le domaine sportif, pour l'analyse des mouvements des sportifs, dans les domaines automobile, robotique, de la réalité virtuelle, de l'animation en trois dimensions et plus généralement dans tout domaine dans lequel on cherche à déterminer ou à observer un mouvement.

Cependant, par rapport à des capteurs non MEMS (notamment des capteurs de fabrication classique, non issus des micro-technologies et utilisés par exemple, dans le domaine de la navigation), ces capteurs MEMS sont très peu onéreux mais ont pour inconvénients d'être relativement peu performants, bruités et biaisés.

Actuellement il existe plusieurs méthodes pour obtenir, à partir de mesures fournies par des accéléromètres, des magnétomètres et des gyromètres, une estimation de l'orientation de l'objet. Il existe notamment des méthodes mettant en œuvre un observateur, qui permettent de fusionner une information double : celle provenant des mesures fournies par les capteurs et celle provenant d'un modèle d'évolution, et ceci tout en maintenant un temps de calcul compatible avec une implémentation en temps réel sur des processeurs relativement puissants (PC, Smartphone).

Les méthodes connues mettant en œuvre un observateur reposent principalement sur l'utilisation d'un filtre de Kalman. L'avantage de cette technique est de permettre la fusion des données tout en tenant compte de la qualité de l'information apportée par les mesures fournies par les capteurs et de la qualité du modèle d'évolution des états cinétiques. Parmi les différents types de filtre de Kalman, on utilise particulièrement le filtre de Kalman étendu (« Extended Kalman Filter » ou EKF en terminologie anglo-saxonne) ; celui-ci est rapide et simple à mettre en œuvre, une de ses applications à la capture de mouvement est notamment décrite dans le document « *Quaternion-based extended Kalman filter for determination orientation by inertial and magnetic sensing* », SABATINI A.M., *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53(7).

Outre le choix du filtre, la qualité des mesures injectées dans le filtre a une grande importance, et notamment la confiance qu'on accorde à leur valeur. En effet, les mesures comportent une partie informative directement liée à l'orientation de l'objet en mouvement et une partie perturbatrice dont la nature dépend du capteur considéré. Au premier ordre, il s'agit des accélérations propres pour les mesures fournies par les accéléromètres, des perturbations magnétiques pour les mesures délivrées par le magnétomètre et le biais pour les gyromètres. Il faut également prendre en compte le bruit de mesure. Cependant celui-ci est classiquement traité dans le filtre.

Il existe plusieurs méthodes pour traiter les perturbations. On peut notamment ne pas tenir compte des mesures perturbées, mais dans le cas où les mesures de plusieurs capteurs présentent simultanément une perturbation, l'observateur n'a plus assez d'informations pour proposer une estimation correcte de l'orientation. On peut également inclure une représentation des perturbations dans le vecteur et le modèle d'état du filtre

3

de Kalman pour les estimer conjointement avec les paramètres de l'attitude du solide. Toutefois, l'estimation conjointe des perturbations et de l'orientation s'avère délicate du fait d'un manque d'observabilité. Elle nécessite en outre le réglage d'un grand nombre de paramètres, ce qui
5 complexifie sa mise en œuvre.

Ces inconvénients ont été surmontés par la demande de brevet internationale publiée sous le n°WO2010/007160, dont la demanderesse est co-titulaire, qui offre un procédé d'estimation de l'orientation fournissant une estimation précise de l'orientation, en présence ou non d'accélération
10 propres et de perturbations magnétiques, et ceci de manière simplifiée par rapport aux procédés existants. Le but énoncé précédemment est atteint par un procédé d'estimation de l'orientation sur la base de mesures selon les trois axes de l'espace de l'accélération, du champ magnétique et de la vitesse de rotation, comportant :

- 15 - une étape de prétraitement de ces mesures pour détecter l'existence d'une perturbation et estimer des mesures non perturbées, et
- une étape d'estimation de l'orientation sur la base des valeurs de mesures issues de l'étape de prétraitement.

Ce procédé présente cependant l'inconvénient de nécessiter l'utilisation
20 d'une puissance de calcul importante qui n'est pas disponible dans un microcontrôleur.

C'est le but de la présente invention de procurer un procédé d'estimation des paramètres d'attitude d'un solide en mouvement, instrumenté par des capteurs de type accéléromètre, gyromètre et magnétomètre, qui remplace
25 la plupart des étapes de calcul du filtre de Kalman par une prise en compte directe de mesures desdits capteurs, corrigées ou non, selon que des perturbations sont détectées ou pas, dans le vecteur d'état.

A cet effet, la présente invention divulgue un procédé d'estimation de
30 l'orientation d'un objet dans l'espace à un instant k utilisant au moins une mesure d'au moins un champ physique sensiblement uniforme dans le temps et dans l'espace et des mesures de la vitesse de rotation dudit objet selon trois axes de l'espace, ledit procédé comprenant une première étape de détection de la présence de perturbations dans les mesures dudit au moins
35 un champ physique et une deuxième étape de calcul d'un quaternion

d'orientation dudit objet dans l'espace déduit d'au moins une représentation des mesures dudit au moins un champ physique en sortie de la première étape, ledit procédé étant caractérisé en ce que, lorsque en sortie de ladite première étape est détectée une perturbation de ladite au moins une mesure, ladite mesure perturbée en sortie de la première étape est combinée en entrée de la deuxième étape avec un quaternion d'orientation dudit objet calculé en sortie d'une troisième étape d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de rotation de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en sortie de la deuxième étape à l'instant $k-1$.

10

Avantageusement, le au moins un champ physique est la gravité terrestre.

Avantageusement, le au moins un champ physique est le champ magnétique terrestre.

15

Avantageusement, le procédé de l'invention utilise des mesures d'au moins deux champs physiques, la gravité terrestre et le champ magnétique terrestre.

Avantageusement, le procédé de l'invention utilise des mesures d'un seul champ physique et des valeurs d'un champ synthétique construites à partir dudit seul champ physique, ledit champ synthétique étant défini tel qu'il ait au moins une composante orthogonale audit champ physique et que son produit vectoriel avec ledit champ physique soit non nul.

25

Avantageusement, ledit champ physique est la gravité G_0 et ledit champ synthétique est un vecteur constitué par une combinaison linéaire de ladite gravité G_0 et d'un vecteur non nul choisi dans un plan orthogonal à G_0 .

Avantageusement, ledit champ physique est le champ magnétique terrestre H_0 et ledit champ synthétique est un vecteur constitué par une combinaison linéaire dudit champ magnétique terrestre H_0 et d'un vecteur non nul choisi dans un plan orthogonal à H_0 .

Avantageusement, le procédé de l'invention comprend en outre dans la première étape, une sous-étape de correction de la vitesse de rotation consistant à retrancher aux mesures de ladite vitesse de rotation un biais moyen déterminé lors d'une étape de position au repos et à lui substituer une

5 vitesse de rotation corrigée.

Avantageusement, la première étape de détection d'une perturbation dans les mesures dudit au moins un champ consiste à déterminer si la différence de la norme des mesures dudit au moins un champ et de leurs valeurs de

10 référence est supérieure à une valeur de seuil choisie.

Avantageusement, la deuxième étape de calcul d'un quaternion d'orientation dudit objet s'effectue par composition d'au moins deux mesures de champs physiques en sortie de la première étape et utilise un algorithme de type

15 TRIAD.

Avantageusement, la deuxième étape de calcul d'un quaternion d'orientation dudit objet s'effectue par composition de mesures de plus de deux mesures de champs physiques en sortie de la première étape et utilise un algorithme

20 de type QUEST.

Avantageusement, la troisième étape d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en sortie de la deuxième étape à l'instant k-1 est effectuée par

25 résolution de l'équation différentielle :

$${}^{L(t)}\dot{\bar{q}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \otimes {}^{L(t)}\bar{q}$$

Avantageusement, le quaternion estimé de l'objet en sortie de la deuxième étape est normalisé.

30

La présente invention divulgue également une centrale d'attitude d'un objet dans l'espace comprenant des moyens de mesure d'au moins un champ physique et de la vitesse de rotation dudit objet selon trois axes de l'espace, ladite centrale comprenant un premier module de prétraitement à l'instant k

pour détecter la présence du au moins un champ physique et un deuxième module de calcul d'un quaternion d'orientation d'au moins une représentation de l'orientation dudit objet calculée à partir d'au moins une représentation des mesures dudit au moins un champ physique en sortie du premier module, ladite centrale étant caractérisée en ce que, lorsque en sortie dudit premier module est détectée une perturbation de ladite au moins une mesure ladite mesure perturbée en sortie du premier module est remplacée en entrée du deuxième module par une mesure combinée avec un quaternion d'orientation dudit objet calculé en sortie d'un troisième module d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en sortie du deuxième module à l'instant k-1.

L'invention présente est utilisable pour toutes les combinaisons de capteurs comportant :

- au moins un capteur apte à restituer une information représentative de la vitesse angulaire (par exemple : un gyroscope, un couple d'accéléromètres séparés par un bras de levier, ...)
- et au moins un capteur apte à restituer une information représentative d'un champ physique \mathbf{P}_0 principalement uniforme et constant dans le temps et l'espace

Le dispositif de l'invention sera préférablement composé d'un gyroscope, d'un accéléromètre (apte à mesurer le champ terrestre gravitationnel \mathbf{G}_0) et d'un magnétomètre (apte à mesurer le champ terrestre magnétique \mathbf{H}_0).

L'invention présente l'avantage de permettre une estimation de la vraie accélération et des vraies perturbations magnétiques :

$$\text{MesuresAccelero} = \text{MatriceOrientation} * (\text{AccVraie} - \text{Go}(0,0,1))$$

$$\text{AccVraie} = \text{Transpose}(\text{MatriceOrientation}) * \text{MesuresAccelero} + \text{Go}(0,0,1).$$

L'invention présente en outre l'avantage de permettre le choix des capteurs dont les mesures sont à privilégier en fonction de différents cas d'emploi. Notamment, dans le cas où une perturbation est détectée sur l'accéléromètre ou le magnétomètre, on privilégie les sorties de l'autre capteur et on réalise un traitement adapté qui est compatible avec une faible capacité de calcul et avec une faible capacité mémoire.

Dans certains de ses modes de réalisation, l'invention peut être avantageusement mise en œuvre en prévoyant une fenêtre d'analyse d'une durée permettant de tester suffisamment l'occurrence de perturbation.

- 5 La présente invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre et des dessins en annexe, sur lesquels :
- la figure 1 représente une architecture fonctionnelle de mise en oeuvre du procédé selon l'art antérieur pour l'échantillon k ;
 - la figure 2 représente une architecture fonctionnelle de mise en oeuvre du
10 procédé de l'invention pour l'échantillon k, dans un de ses modes de réalisation ;
 - la figure 2b représente une variante de l'architecture fonctionnelle de la figure 2, dans certains de ses modes de réalisation ;
 - la figure 3 représente un détail de la figure 2b ;
 - 15 - les figures 4a à 4g représentent des mesures réalisées sur un accéléromètre lors de la mise en œuvre de l'invention dans l'architecture de la figure 2b ;
 - les figures 5a à 5f représentent des mesures réalisées sur un
20 magnétomètre lors de la mise en œuvre de l'invention dans l'architecture de la figure 2b.

La figure 1 représente une architecture fonctionnelle de mise en oeuvre du procédé selon l'art antérieur pour l'échantillon k.

25 Cette figure illustre la mise en œuvre du procédé divulgué par la demande internationale publiée sous le n°WO2010/007160, dont les notations et certaines étapes sont utilisées dans le cadre de la mise en œuvre de la présente invention.

On souhaite obtenir l'orientation d'un objet se déplaçant dans l'espace, par exemple l'orientation d'une personne (si le capteur est disposé sur le buste
30 ou à la ceinture) ou d'un segment d'une personne (si le capteur est disposé sur la partie du corps à laquelle on s'intéresse). Pour cela, on utilise une centrale d'attitude comportant des capteurs aptes à fournir des mesures de l'accélération totale, de champ magnétique et de la vitesse de rotation selon les trois axes de l'espace. Les capteurs sont avantageusement des capteurs
35 MEMS offrant un prix de revient réduit et un encombrement limité.

Ce procédé de l'art antérieur comporte une étape 110 d'initialisation de la centrale d'attitude, une étape 120 de prétraitement des mesures fournies par les capteurs et une troisième étape de traitement 130 par un observateur, de type Extended Kalman Filter ou EKF.

5

Selon l'invention, on peut diversifier les capteurs ; par exemple, pour la mesure de l'accélération, le système peut être constitué d'un accéléromètre tri axe ou de trois accéléromètres mono axe fournissant une mesure sur chacun des axes.

10 Notre invention décrit principalement le procédé utilisant les trois modalités de mesures précitées mais le raisonnement est le même pour un autre triplet de capteurs.

Les propriétés minimales du dispositif doivent, de manière privilégiée, être les suivantes :

15 - Un capteur de mesure \mathbf{y}_G à au moins un axe sensible, apte à restituer une mesure liée à la vitesse angulaire ω par un modèle identifiable ;

- Un capteur de mesure \mathbf{y}_A à au moins un axe sensible apte à restituer une mesure d'un champ de référence \mathbf{G}_0 fixe dans le repère de référence et identifiable à un moment donné, auquel peut s'ajouter une variation \mathbf{a} de même nature que \mathbf{G}_0 mais non connue a priori ;

20 Préférentiellement, ces capteurs sont respectivement : un gyromètre et un accéléromètre ou un magnétomètre. Il faut noter que dans le procédé s'appuyant sur le précédent dispositif, une étape de construction d'une mesure d'un champ physique synthétique orthogonal à \mathbf{G}_0 sera alors réalisée.

25 Un dispositif préférable un peu plus coûteux mais plus performant possède les propriétés minimales suivantes :

- Un capteur de mesure \mathbf{y}_G à au moins un axe sensible, apte à restituer une mesure liée à la vitesse angulaire ω par un modèle identifiable ;

30 - Un capteur de mesure \mathbf{y}_A à au moins un axe sensible apte à restituer une mesure d'un champ de référence \mathbf{G}_0 fixe dans le repère de référence et identifiable à un moment donné, auquel peut s'ajouter une variation \mathbf{a} de même nature que \mathbf{G}_0 mais non connue a priori ;

- Un capteur de mesure \mathbf{y}_M à au moins un axe de mesure apte à restituer une mesure d'un champ de référence \mathbf{H}_0 fixe dans le repère de

35

référence et identifiable à un moment donné, auquel peut s'ajouter une variation \mathbf{m} de même nature que \mathbf{G}_0 mais non connue a priori.

Préférentiellement, ces capteurs sont respectivement : un gyromètre, un accéléromètre et un magnétomètre.

5 Il faut noter que ces trois types de capteurs fournissent des informations complémentaires en vue d'une meilleure estimation de l'orientation, notamment si l'on dispose de capteurs tri-axiaux :

- Le gyromètre, si on l'intègre, apporte des informations angulaires à trois degrés de liberté, mais en relatif, c'est-à-dire avec une propension à la dérive si ledit gyromètre est utilisé seul ;

10 - L'accéléromètre apporte deux degrés de liberté angulaires absolus (roll et pitch), qui sont accessibles en statique si ledit accéléromètre est utilisé seul ;

- Le magnétomètre apporte deux degrés de liberté angulaires (dont le lacet ou yaw), qui sont accessibles dans un contexte non perturbé magnétiquement si ledit magnétomètre est utilisé seul.

On peut généraliser la présente invention qui reste valable pour tout capteur axial apte à mesurer une direction uniforme de l'espace pour remplacer les capteurs de mesure du champ physique apportant une information additionnelle au gyroscope.

On pense notamment aux mesures de DOA (Direction of Arrival) pour tout type d'ondes électromagnétiques, en particulier les champs d'ondes émis par les balises que les opérateurs de téléphonie mobile utilisent pour mailler l'espace de couverture de réseau, ou des cellules photoélectriques selon des modalités divulguées par la demande de brevet européenne publiée sous le n° EP1984696). Il peut s'agir aussi d'un dispositif utilisant des ondes ultrasonores planes provenant d'une source lointaine et dont la direction est mesurée et joue le rôle du champ physique.

30 Un des avantages du couple accéléromètre-magnétomètre est la capacité de chacun de ces deux capteurs à fournir ces deux DDL complémentaires. On peut cependant très bien utiliser d'autres capteurs vectoriels qui se complètent de la même manière. L'accéléromètre est cependant nécessaire si on veut estimer l'accélération propre, la vitesse linéaire ou la position...

Pour les mesures de champ magnétique, les capteurs privilégiés peuvent être un magnétomètre tri axe ou trois magnétomètres mono axe.

Pour la mesure de la vitesse de rotation, les capteurs privilégiés peuvent être trois gyromètres mono axe, avantageusement deux gyromètres bi axe ou un gyromètre tri axe.

5

Les triaxes peuvent être alignés ou non, dans ce dernier cas l'orientation relative entre les axes doit être connue.

Dans la suite de la description, à des fins de simplicité, nous désignerons le ou les accéléromètres, par un accéléromètre, le ou les magnétomètres par un magnétomètre et le ou les gyromètres par un gyromètre. Ces capteurs sont attachés à l'objet dont on souhaite connaître l'orientation.

10

Nous disposons des mesures \mathbf{Y} , que nous modélisons en notations vectorielles par :

15

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_A = {}^L_G \mathbf{R} ({}^G \mathbf{G}_0 + {}^G \mathbf{a}) + \mathbf{v}_A \\ \mathbf{Y}_M = {}^L_G \mathbf{R} ({}^G \mathbf{H}_0 + {}^G \mathbf{h}) + \mathbf{v}_M \\ \mathbf{Y}_G = {}^L \boldsymbol{\omega} + \mathbf{b} + \mathbf{v}_G \end{cases} \quad (1)$$

Où les préfixes L et G précisent si le vecteur est exprimé dans le repère global $\{G\}$ fixe ou dans le repère local $\{L\}$ mobile. avec :

\mathbf{Y}_A : mesure tri-axe de l'accélération totale fournie par l'accéléromètre,

20

\mathbf{Y}_M : mesure tri-axe du champ magnétique fournie par le magnétomètre,

\mathbf{Y}_G : mesure tri-axe de la vitesse de rotation fournie par le gyromètre, notée également $\boldsymbol{\omega}$

${}^L_G \mathbf{R}$: est la matrice de passage du repère global au repère local (matrice de rotation),

25

\mathbf{G}_0 : champ de gravité terrestre (vecteur 3×1), exprimé dans le repère fixe en général, soit $(0,0,1)$,

\mathbf{H}_0 : champ magnétique terrestre (vecteur 3x1), également exprimé dans le repère fixe en général, soit $(0.5 ; 0 ; \frac{\sqrt{3}}{2})$

$\boldsymbol{\omega}$: vitesse angulaire,

5 \mathbf{a} : accélérations propres ou variations perturbatrices d'accélération.

\mathbf{h} : perturbations magnétiques,

\mathbf{b} : biais du gyromètre,

\mathbf{v}_A : bruit de mesure de l'accéléromètre,

10 \mathbf{v}_M : bruit de mesure du magnétomètre,

\mathbf{v}_G : bruit de mesure du gyromètre.

L'orientation est estimée par rapport à un repère de référence, entièrement défini par la donnée des vecteurs \mathbf{G}_0 et \mathbf{H}_0 . Par exemple,
15 le repère géocentrique est défini par les vecteurs

$\mathbf{G}_0 (0 ; 0 ; 1)$ et $\mathbf{H}_0 (0.5 ; 0 ; \frac{\sqrt{3}}{2})$

A des fins de simplicité, nous ne distinguerons pas les mesures selon les trois directions de l'espace.

20 Comme cela apparaît clairement au vu de la définition mathématique des mesures (voir par exemple : Harold D. Black. *A passive system for determining the attitude of a satellite*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2(7):1350–1351, July 1964), chacune de ces mesures comporte respectivement une première partie « $R\mathbf{G}_0$ », « $R\mathbf{H}_0$ » et $\boldsymbol{\omega}$, qui contient l'information permettant d'obtenir une estimation
25 de l'orientation, une deuxième partie \mathbf{a} , \mathbf{d} et \mathbf{b} qui représente les perturbations éventuelles pouvant apparaître, de façon aléatoire dans les mesures, et enfin une troisième partie \mathbf{v}_A , \mathbf{v}_M , \mathbf{v}_G représentant le bruit de mesure au niveau de chaque capteur.

30 On commence par définir ci-dessous les conventions de notation utilisées dans la suite des développements .

On utilise de manière préférentielle les quaternions pour la représentation des grandeurs. Il existe plusieurs notations de quaternions. La notation académique est celle de Hamilton. Nous utiliserons plutôt celle qui privilégie les multiplications de quaternions dans un ordre naturel. Elle a été proposée

5 par le JPL (Jet Propulsion Laboratory) en 1999 (voir par exemple : W. G. Breckenridge, "Quaternions - Proposed Standard Conventions," JPL, Tech. Rep. INTEROFFICE MEMORANDUM. IOM 343-79-1199, 1999 ;

Nikolas Trawny et Stergios I. Roumeliotis, "Indirect Kalman Filter for 3D Attitude Estimation", A Tutorial for Quaternion Algebra, Department of

10 Computer Science & Engineering, University of Minnesota. Technical Report, 2005-002, Rev. 57, March 2005).

Selon cette notation, le quaternion sera noté \bar{q} et défini comme suit :

$$\bar{q} = \underbrace{q_4}_{\text{partie réelle}} + \underbrace{q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k}}_{\text{partie imaginaire}} \quad (2)$$

En notation matricielle, on peut aussi écrire :

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ q_4 \end{bmatrix} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4]^T \quad (3)$$

Si \mathbf{q} et q_4 remplissent les conditions ci-après, ce qui sera le cas pour tout

15 notre exposé, \bar{q} est dit quaternion unitaire. Il représente alors une rotation d'angle θ autour du vecteur unitaire $\hat{\mathbf{k}}$:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} k_x \sin(\theta/2) \\ k_y \sin(\theta/2) \\ k_z \sin(\theta/2) \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{k}} \sin(\theta/2) \quad \text{et} \quad q_4 = \cos(\theta/2) \quad (4)$$

Un vecteur \mathbf{p} dans l'espace (3 coordonnées) peut être représenté sous forme de quaternion :

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nous utiliserons les notations suivantes pour préciser les repères de

20 référence dans lesquels les vecteurs s'expriment :

$${}^L \mathbf{p} = {}^L C(\bar{q})^G \mathbf{p} \quad (6)$$

Où :

- $\bar{q} = {}^L \bar{q}$
- ${}^L C(\bar{q})$ est une matrice de rotation (3x3) qui exprime le repère global $\{G\}$ dans le repère local $\{L\}$.

5

Avec cette notation, on peut passer du système de coordonnées du repère local (repère capteur mobile) au global (repère fixe) et inversement par l'expression suivante :

$${}^L \bar{p} = {}^L \bar{q} \otimes {}^G \bar{p} \otimes {}^L \bar{q}^{-1} \quad (7)$$

- 10 Nous manipulons des vitesses angulaires du système de coordonnées local $\{L\}$ communément celui du capteur en mouvement par rapport au repère global $\{G\}$, la dérivée temporelle du quaternion s'exprime à partir de l'expression générale (voir Trawny et Roumeliotis, référence citée ci-dessus) :

$${}^L \dot{\bar{q}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \left({}^{L(t+\Delta t)} \bar{q} - {}^{L(t+\Delta t)} \bar{q}(t) \right) \quad (8)$$

- 15 Or :

$${}^{L(t+\Delta t)} \bar{q} = {}^{L(t+\Delta t)} \bar{q} \otimes {}^{L(t)} \bar{q} \quad (9)$$

Où la rotation de $\{L(t)\}$ à $\{L(t+\Delta t)\}$ s'exprime de la façon suivante:

$${}^{L(t+\Delta t)} \bar{q} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{k}} \sin(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) \end{bmatrix} \underset{\Delta t \approx 0}{\approx} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{k}} \cdot \theta/2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \delta \boldsymbol{\theta} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Le vecteur $\delta \boldsymbol{\theta}$ est de même direction que l'axe de la rotation faisant passer de $\{L(t)\}$ à $\{L(t+\Delta t)\}$ et a une magnitude égale à l'angle de rotation. Or, la définition de la vitesse angulaire nous donne :

$$\boldsymbol{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \boldsymbol{\theta}}{\Delta t} \quad (11)$$

Donc, d'après les expressions (8),(9),(10) et (11) :

$${}^{L(t)}\dot{\bar{q}}_G = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \otimes {}^{L(t)}\bar{q}_G \quad (12)$$

Nous aurons besoin d'intégrer un quaternion pour estimer les angles à partir des mesures $\boldsymbol{\omega}$ du gyro. Intégrer un quaternion est équivalent à résoudre l'équation différentielle du 1^{er} ordre ci-dessus. Dans Trawny et Roumeliotis, (référence citée ci-dessus), on trouve la solution à l'ordre 0:

$${}^L\bar{q}_G(t_{k+1}) = \left(\cos\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) + \frac{1}{|\boldsymbol{\omega}|} \sin\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) \cdot \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) \right) {}^L\bar{q}_G(t_k) \quad (13)$$

Où

$$\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y & \omega_x \\ -\omega_z & 0 & \omega_x & \omega_y \\ \omega_y & -\omega_x & 0 & \omega_z \\ -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

(13) a une expression plus stable lorsque $\boldsymbol{\omega} \rightarrow 0$:

$$\lim_{|\boldsymbol{\omega}| \rightarrow 0} ({}^L\bar{q}_G(t_{k+1})) = \left(I_{4 \times 4} + \frac{\Delta t}{2} \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}) \right) {}^L\bar{q}_G(t_k) \quad (15)$$

Notons que (13) peut se réécrire aussi :

$${}^L\bar{q}_G(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{\omega}}{|\boldsymbol{\omega}|} \cdot \sin\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) \\ \cos\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) \end{bmatrix} \otimes {}^L\bar{q}_G(t_k) \quad (16)$$

où l'on voit que la solution à t_{k+1} n'est autre que la rotation du repère précédent pris à t_k selon un axe défini par $\boldsymbol{\omega}$ avec un angle de rotation égal à $|\boldsymbol{\omega}| \Delta t$, ce qui correspond à l'hypothèse à l'ordre 0 qui veut que $\boldsymbol{\omega}$ est constant

entre t_k et t_{k+1} . Un homme du métier de la capture de mouvement pourra consulter la littérature, notamment Trawny et Roumeliotis, (référence citée ci-dessus) pour établir les solutions aux ordres supérieurs (accélération angulaire constante, jerk angulaire constant, etc...).

- 5 Le cadre de référence des notations permettant de décrire la présente invention est maintenant posé.

Nous pouvons à présent décrire les étapes du procédé de traitement à l'aide des notations précédemment définies.

- 10 La figure 2 représente une architecture fonctionnelle de mise en oeuvre du procédé de l'invention pour l'échantillon k , dans un de ses modes de réalisation.

Avec les mêmes nommages de variables que dans la référence Black citée plus haut, on peut écrire les modèles de mesure pour les différents capteurs

- 15 du dispositif considéré (deux capteurs de champs \mathbf{G}_0 et \mathbf{H}_0 uniformes dans le repère absolu, par exemple un accéléromètre et un magnétomètre, et un capteur représentatif de la vitesse angulaire, par exemple un gyromètre) sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}_G \\ \mathbf{Y}_A \\ \mathbf{Y}_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{b} \\ \bar{q} \otimes (\mathbf{G}_0 + \mathbf{a}) \otimes \bar{q}^{-1} \\ \bar{q} \otimes (\mathbf{H}_0 + \mathbf{h}) \otimes \bar{q}^{-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{v}_G \\ \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v}_M \end{pmatrix} \quad (17)$$

- 20 A t_0 , on peut considérer que le dispositif est dans sa position neutre ou de référence et qu'il est immobile, de sorte que seuls les champs \mathbf{G}_0 et \mathbf{H}_0 sont mesurés, sans accélération \mathbf{a} ni perturbation \mathbf{h} . Le repère capteur se confond avec le repère fixe de référence et, si on néglige les bruits capteurs :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}_G(t_0) \\ \mathbf{Y}_A(t_0) \\ \mathbf{Y}_M(t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ {}^G \mathbf{G}_0 \\ {}^G \mathbf{H}_0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

- 25 Cette équation montre qu'on peut enregistrer par la mesure les champs de référence \mathbf{G}_0 et \mathbf{H}_0 à t_0 ou, si on le désire, à chaque fois que \mathbf{a} et \mathbf{h} sont nuls.

A $t > t_0$, considérons que le dispositif a quitté sa position neutre et se met en mouvement.

Le principe général des traitements selon l'invention est le suivant :

- Les mesures sont pré-traitées soit pour éliminer le biais (cas du gyromètre), soit pour détecter les perturbations dont elles sont éventuellement affectées ; ces pré-traitements sont similaires à ceux effectués selon l'art antérieur ; ils sont indiqués sur la figure 2 par les références 210, 220 et 230 ;
- Lorsque les mesures en sortie de l'accéléromètre et du magnétomètre (ou d'autres capteurs remplissant les mêmes fonctions, comme indiqué plus haut) ne sont pas perturbées, l'orientation est fournie par un algorithme classique représenté sur la figure 2 par la référence 240 ;
- Lorsqu'une des mesures en sortie d'un de ces capteurs est perturbée, elle est remplacée en entrée de l'algorithme de calcul de l'orientation par une mesure reconstruite à partir du quaternion calculé par un algorithme référencé 250 sur la figure 2, auquel sont fournis la vitesse angulaire en sortie du gyromètre et le quaternion en sortie de l'algorithme de calcul 240 à l'instant k-1.

Les mesures sont donc d'abord pré-traitées :

- Le traitement 210 permet de filtrer le gyromètre pour éliminer son biais **b**. Ce traitement consiste à évaluer sa variance sur une fenêtre glissante d'une durée choisie T (par exemple 1 seconde). Si la variance reste en deça d'un certain seuil, on peut considérer que le gyromètre ne subit pas de vitesse angulaire. On établit la moyenne sur la fenêtre, ce qui donne une estimée du biais **b** sur chaque axe de mesure.

210 s'exprime donc ainsi:

$$\begin{aligned} \text{si } \text{var}(Y_G(t_{k-T+1}), \dots, Y_G(t_k)) \leq \alpha_G &\Rightarrow \tilde{Y}_G(t_k) = Y_G(t_k) - \langle Y_G \rangle_T \\ \text{si } \text{var}(Y_G(t_{k-T+1}), \dots, Y_G(t_k)) > \alpha_G &\Rightarrow \tilde{Y}_G(t_k) = Y_G(t_k) \end{aligned} \quad (19)$$

- on applique ce procédé préférentiellement à l'initialisation en veillant à ce que le mobile observe une période stable supérieure à T ; néanmoins, le biais peut être calculé en permanence sachant qu'il ne sera rafraîchi que si les conditions de seuil (19) sont respectées; dans (19) , le test est effectué pour chaque axe du gyroscope, ce qui permet de corriger éventuellement un axe lorsqu'aucun mouvement rotatoire n'est observé par ledite axe ; néanmoins, on peut remplacer Y_G par sa

norme pour ce test de la variance ; En ce cas, il faut que le mobile observe une position stable absolue (complète) pour que les corrections s'appliquent (par conséquent sur tous les axes) ; on confondra parfois la notation t_k avec la notation k pour désigner l'instant.

- Le traitement 220 permet de tester les mesures de l'accéléromètre (ou d'un capteur équivalent de champ uniforme) ; on applique le test proprement dit de l'existence ou non d'une accélération propre. Pour ce faire, on compare la norme de la mesure $Y_{A,k}$ à la norme du champ gravitationnel (pour rappel, on travaille en multiple de G_0), on fait donc une comparaison par rapport à 1 : Si $\left| \|Y_{A,k}\| - 1 \right| < \alpha_A$,

Avantageusement, en cas de test positif, on ajoute le test suivant : $|\hat{a}_{k-1}| < \beta_A$

La comparaison de la norme de l'accélération propre estimée à l'instant $k-1$, \hat{a}_{k-1} , à β_A , permet avantageusement d'exclure des cas particuliers pour lesquels le premier test ne suffirait pas. En effet, on considère que si à l'instant $k-1$ l'accélération propre a une valeur élevée, i.e. supérieure à β_A , il est peu probable qu'à l'instant k l'accélération propre soit inférieure à β_A . α_A et β_A sont par exemple égaux à 0,04 et 0,2 respectivement.

Ce deuxième test améliore donc la précision de l'estimation de la mesure non perturbée $\tilde{Y}_{A,k}$ et donc de l'estimation de l'orientation.

→ Si les tests ci-dessus sont positifs, on décide alors que l'accélération propre \hat{a}_k est nulle à l'instant k .

Le raisonnement est le même pour le filtre 230 concernant le magnétomètre (ou un autre capteur équivalent de champ uniforme).

La suite consiste à construire des mesures non perturbées :

- Si les tests précédents 220 ou 230 sont positifs, il n'y a pas de perturbations :

$$\begin{aligned} \text{si } test_{220} > 0 &\Rightarrow \tilde{Y}_{A,k} = Y_A \\ \text{si } test_{230} > 0 &\Rightarrow \tilde{Y}_{M,k} = Y_M \end{aligned} \tag{20}$$

- Si les tests précédents 220 et/ou 230 sont négatifs, il y a des perturbations, on construit alors, via le filtre CNP (Construction Non Perturbée) une mesure artificielle basée sur le ou les champs de référence et sur le quaternion estimé au même instant par le filtre 250, dont le fonctionnement est décrit plus loin. La construction de cette mesure non perturbée s'exprime comme suit (valable pour \mathbf{Y}_A et \mathbf{Y}_M) :

$$\tilde{\mathbf{Y}}_k = \bar{q}_k \otimes \mathbf{G}_0 \otimes \bar{q}_k^{-1} \quad (21)$$

L'équation ci-dessus s'applique pour $\tilde{\mathbf{Y}}_{Ak}$ autant que pour $\tilde{\mathbf{Y}}_{Mk}$, avec le même formalisme (en utilisant \mathbf{H}_0 au lieu de \mathbf{G}_0).

- 10 Les mesures $\tilde{\mathbf{Y}}_{Ak}$ et $\tilde{\mathbf{Y}}_{Mk}$, sont ensuite directement mises en entrée d'un algorithme de calcul traditionnel d'orientation de type TRIAD (TRI-axial Attitude Determination)

par exemple (cf : http://en.wikipedia.org/wiki/Triad_Method

ou publication 1964 de Harold Black déjà citée). Cet algorithme permet

- 15 d'estimer un quaternion de rotation à partir de la mesure des deux directions de référence fournies par les données $\tilde{\mathbf{Y}}_{Ak}$ et $\tilde{\mathbf{Y}}_{Mk}$. Mais tout autre algorithme permettant de calculer l'orientation d'un objet dans un repère de référence à partir de sa position par rapport aux vecteurs champ gravitationnel et champ magnétique terrestres (ou de tout autre champ uniforme) peut remplacer
- 20 l'algorithme TRIAD. En particulier, dans le cas de plus de deux capteurs, un algorithme de type QUEST (Quaternion ESTimator), décrit notamment dans la publication <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/courses/aoe4140/attde.pdf> et, en comparaison avec TRIAD dans

http://www.malcolmdshuster.com/comm_1981a_J_TRIAD-QUEST.pdf

- 25 Il est également possible d'utiliser d'autres algorithmes remplissant la même fonction technique, par exemple un algorithme de descente de gradient tel que celui divulgué par la demande de brevet internationale publiée sous le numéro WO03085357.

Le quaternion \bar{q}_k résultant est la réponse de notre système pour fournir

- 30 l'orientation du dispositif.

Cette estimation \bar{q}_k est ensuite ré-introduite dans le système d'intégration 250. Ce traitement permet de considérer l'attitude estimée actuelle \bar{q}_k et de mettre à jour à l'instant k+1 grâce à la mesure de vitesse angulaire du

gyromètre et la rotation élémentaire qui en découle entre k et k+1. D'après (16), le nouveau quaternion est donné par :

$${}^L_G\bar{q}(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} \frac{\boldsymbol{\omega}}{|\boldsymbol{\omega}|} \cdot \sin\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) \\ \cos\left(\frac{|\boldsymbol{\omega}|}{2} \Delta t\right) \end{bmatrix} \otimes {}^L_G\bar{q}(t_k) \tag{22}$$

La figure 2b représente une variante de l'architecture fonctionnelle de la figure 2, dans certains de ses modes de réalisation.

- 5 Dans cette variante, on introduit entre le module de calcul du biais du gyromètre 210 (ou module de débiaisage) et le module d'intégration du gyromètre 250, un buffer 2110b qui crée une fenêtre temporelle de durée D destinée à optimiser la fonction de test d'occurrence des perturbations de l'accéléromètre et du magnétomètre.
- 10 Les modules CNP, 220b pour l'accéléromètre et 230b pour le magnétomètre, de Construction Non Perturbée intègrent les fonctions de test, comme détaillé dans la figure 3.

La figure 3 représente un détail de la figure 2b.

- 15 Est représentée sur la figure la constitution du module CNP 220b, de Construction Non perturbée des mesures de l'accéléromètre de la figure 2b. La mesure en entrée de CNP est $Y_{A,k}$. La sortie $\tilde{Y}_{A,k}$ de CNP est la valeur exploitée par l'algorithme de calcul d'orientation 240, de type TRIAD ou QUEST, par exemple.
- 20 On crée un buffer 310 pour stocker les échantillons du signal de mesure de champ sur une D durée identique au retard introduit sur le signal gyromètre débiaisé.

Le test de perturbation de la mesure $Y_{A,k}$ consiste à fournir la bascule 1/0 sur la ligne après le & 320. Cette bascule consiste à réaliser le filtre suiveur de l'entrée vers la sortie (1=pas de perturbation) ou la mesure reconstruite par la rotation estimée du gyromètre seul. Ce test est par exemple la conjonction de 2 conditions :

- Test 330 : la norme de l'accéléromètre est en moyenne (sur la fenêtre D) proche ($<\alpha$) de celle la gravité, G_0 ;

- Test 340 : la variance du signal sur la fenêtre D est faible ($<\beta$).

La Construction Non Perturbée est fournie en sortie de la boîte 350 par la formule suivante :

$$\tilde{Y}_{A,k-D} = \tilde{q}_{k-D} \otimes G_0 \otimes \tilde{q}_{k-D}^{-1}$$

- 5 Le module 230b de Construction Non Perturbée des mesures du magnétomètre de la figure 2b est similaire au module 220b représenté en détail sur la figure 3. Cependant, $Y_{A,k}$ est remplacé par $Y_{M,k}$; $\tilde{Y}_{A,k}$ est remplacé par $\tilde{Y}_{M,k}$; G_0 est remplacé par H_0 .

- 10 Les figures 4a à 4g représentent des mesures réalisées sur un accéléromètre lors de la mise en œuvre de l'invention dans l'architecture de la figure 2b.

Sur ces figures, on voit l'effet du remplacement des mesures de l'accéléromètre par leur reconstruction basée sur l'intégration du gyromètre.

- 15 Les courbes sont superposées en compensant le retard introduit.

En présence de perturbations (accélérations propres), le filtre CNP met son interrupteur à 1. On constate que les courbes en pointillé des figures 4a, 4b et 4c (reconstruites sur les axes x, y et z) diffèrent lors de ces phases des courbes en trait plein et qu'elles sont beaucoup moins énergétiques, ne comportant alors plus que les composantes en orientation des mesures de l'accéléromètre.

- 20 Le capteur est secoué, ce qui ajoute de l'accélération propre au-delà de la gravité mais maintient des changements d'orientation dans le signal. Par construction la norme de $\tilde{Y}_{A,k}$ (somme des carrés des 3 courbes en pointillé
25 selon les trois axes) reste celle de $G_0=1g$.

Les figures 5a à 5f représentent des mesures réalisées sur un magnétomètre lors de la mise en œuvre de l'invention dans l'architecture de la figure 2b.

- 30 Ces enregistrements sont effectués lors du même mouvement que celui représenté sur les figures 4a à 4g. On s'intéresse au magnétomètre. Lors du mouvement, le capteur ne fait manifestement pas l'expérience de grosses perturbations magnétiques, ce qui a pour conséquence d'observer peu de différences entre les courbes de mesures et celles de reconstruction.

Les exemples décrits ci-dessus sont donnés à titre d'illustration de modes de réalisation de l'invention. Ils ne limitent en aucune manière le champ de l'invention qui est défini par les revendications qui suivent.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'estimation de l'orientation d'un objet dans l'espace à un instant k utilisant au moins une mesure (y_A, y_M) d'au moins un champ physique sensiblement uniforme dans le temps et dans l'espace et des
5 mesures de la vitesse de rotation (y_G) dudit objet selon trois axes de l'espace, ledit procédé comprenant une première étape de détection (220, 230) de la présence de perturbations dans les mesures dudit au moins un champ physique et une deuxième étape (240) de calcul d'un quaternion $(\overline{q_k})$ d'orientation dudit objet dans l'espace déduit d'au
10 moins une représentation des mesures dudit au moins un champ physique en sortie de la première étape, ledit procédé étant caractérisé en ce que, lorsque en sortie de ladite première étape est détectée une perturbation de ladite au moins une mesure (y_A, y_M) , ladite mesure perturbée en sortie de la première étape est combinée en entrée de la
15 deuxième étape avec un quaternion d'orientation dudit objet calculé en sortie d'une troisième étape (250) d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de rotation de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en sortie de la deuxième étape à l'instant $k-1$
- 20 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le au moins un champ physique est la gravité terrestre.
3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le au moins un champ physique est le champ magnétique terrestre.
- 25 4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il utilise des mesures d'au moins deux champs physiques, la gravité terrestre et le champ magnétique terrestre.
- 30 5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il utilise des mesures d'un seul champ physique et des valeurs d'un champ synthétique construites à partir dudit seul champ physique, ledit champ synthétique étant défini tel qu'il ait au moins une composante

orthogonale audit champ physique et que son produit vectoriel avec ledit champ physique soit non nul.

- 5 6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que ledit champ physique est la gravité G_0 et ledit champ synthétique est un vecteur constitué par une combinaison linéaire de ladite gravité G_0 et d'un vecteur non nul choisi dans un plan orthogonal à G_0 .
- 10 7. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que ledit champ physique est le champ magnétique terrestre H_0 et ledit champ synthétique est un vecteur constitué par une combinaison linéaire dudit champ magnétique terrestre H_0 et d'un vecteur non nul choisi dans un plan orthogonal à H_0 .
- 15 8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce qu'il comprend en outre dans la première étape, une sous-étape de correction (210) de la vitesse de rotation ($y_{G,k}$) consistant à retrancher aux mesures de ladite vitesse de rotation un biais moyen (\hat{b}_{moyen}) déterminé lors d'une étape de position au repos et à lui substituer une
20 vitesse de rotation corrigée ($\tilde{y}_{G,k}$).
9. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que la sous-étape (210) de correction est suivie par une étape (2110b) de stockage d'échantillons du signal sur une durée D.
- 25 10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que la première étape de détection (220, 230) d'une perturbation dans les mesures dudit au moins un champ consiste à déterminer si la différence de la norme des mesures (y_A, y_M) dudit au moins un champ et de leurs valeurs de référence (G_0, H_0) est supérieure à une valeur de seuil choisie (α_A, α_M).
- 30 11. Procédé selon les revendications 9 et 10, caractérisé en ce que la première étape de détection d'une perturbation dans les mesures dudit au moins un champ consiste à déterminer en outre si la variance des
35

échantillons $(y_{A,k}, y_{M,k})$ du signal de mesure dudit champ stockés dans un buffer de durée D est supérieure à une valeur de seuil choisie (β_A, β_M)

- 5 12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la deuxième étape de calcul d'un quaternion (\overline{q}_k) d'orientation dudit objet s'effectue par composition d'au moins deux mesures de champs physiques en sortie de la première étape et utilise un algorithme de type TRIAD.
- 10 13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la deuxième étape de calcul d'un quaternion (\overline{q}_k) d'orientation dudit objet s'effectue par composition de mesures de plus de deux mesures de champs physiques en sortie de la première étape et utilise un
- 15 algorithme de type QUEST.
14. Procédé selon l'une des revendications 1 à 13, caractérisé en ce que la troisième étape d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en
- 20 sortie de la deuxième étape à l'instant k-1 est effectuée par résolution de l'équation différentielle :
- $${}^{L(t)}\dot{\overline{q}}_G = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \otimes {}^{L(t)}\overline{q}_G$$
- 25 15. Procédé selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce que le quaternion estimé de l'objet en sortie de la deuxième étape est normalisé.
- 30 16. Centrale d'attitude d'un objet dans l'espace comprenant des moyens de mesure d'au moins un champ physique (y_A, y_M) et de la vitesse de rotation (y_G) dudit objet selon trois axes de l'espace, ladite centrale comprenant un premier module de prétraitement à l'instant k pour détecter la présence du au moins un champ physique (y_A, y_M) et un deuxième module de calcul d'un quaternion (\overline{q}_k) d'orientation d'au moins une représentation de l'orientation dudit objet calculée à partir

d'au moins une représentation des mesures dudit au moins un champ physique en sortie du premier module, ladite centrale étant caractérisée en ce que, lorsque en sortie dudit premier module est détectée une perturbation de ladite au moins une mesure (y_A, y_M) , ladite mesure perturbée en sortie du premier module est remplacée en entrée du deuxième module par une mesure combinée avec un quaternion d'orientation dudit objet calculé en sortie d'un troisième module d'intégration d'une sortie corrigée de la mesure de vitesse de l'objet à partir d'un quaternion d'orientation dudit objet en sortie du deuxième module à l'instant $k-1$.

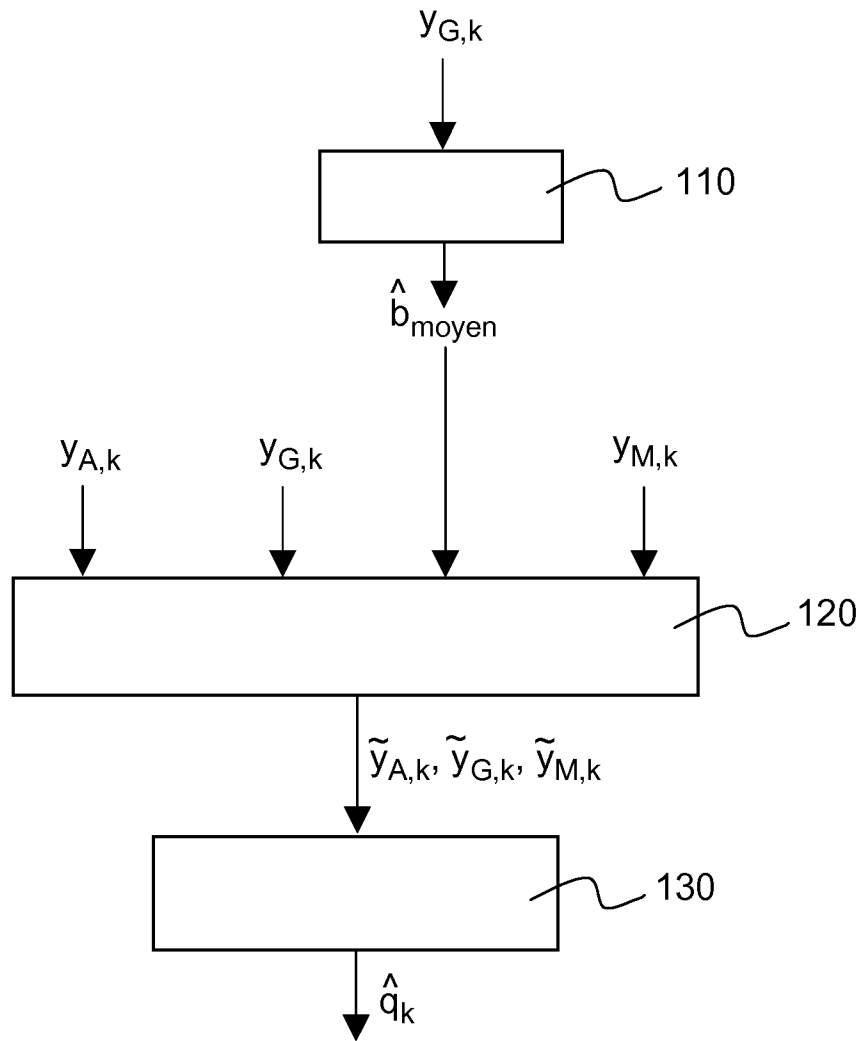


FIG.1

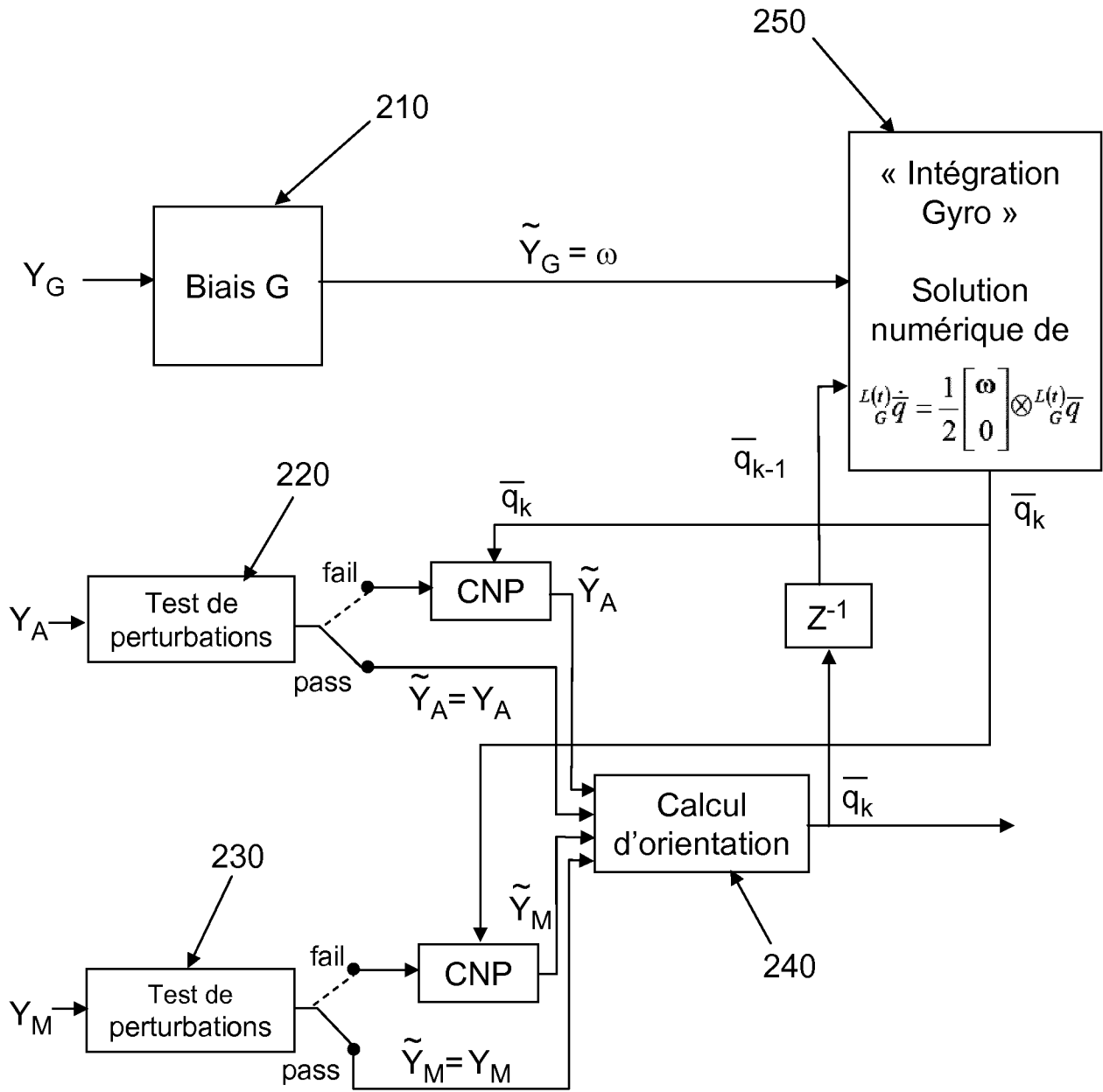


FIG.2

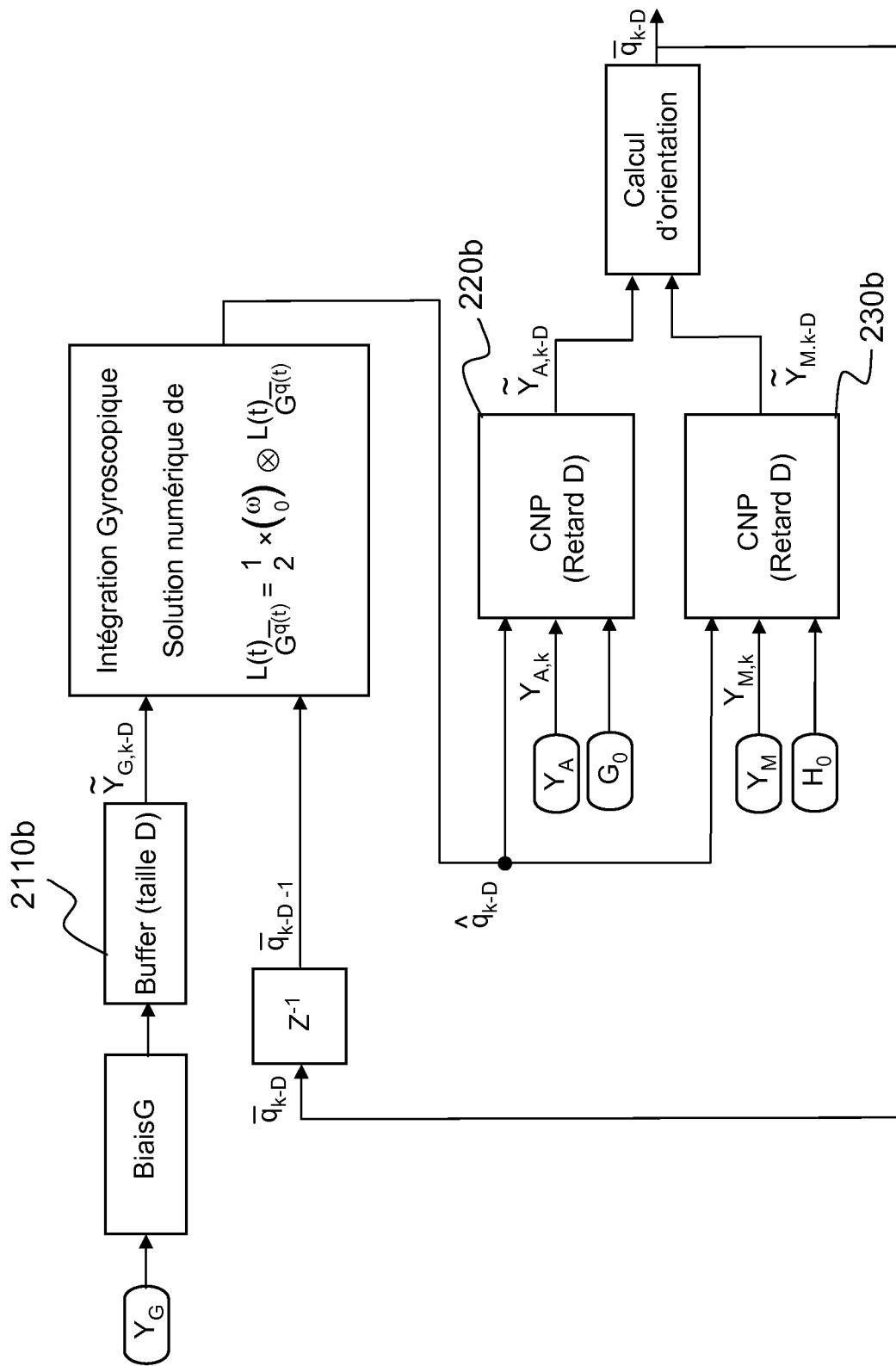


FIG.2b

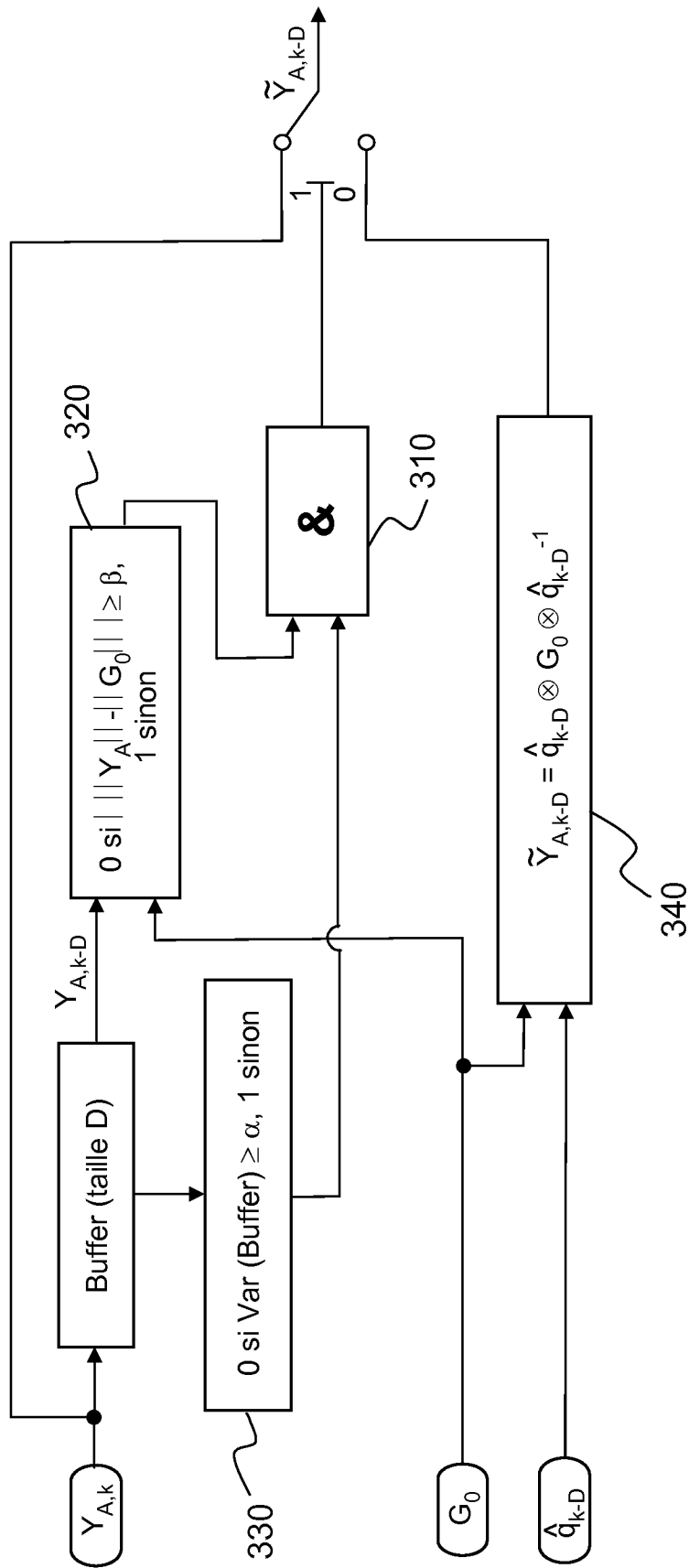


FIG.3

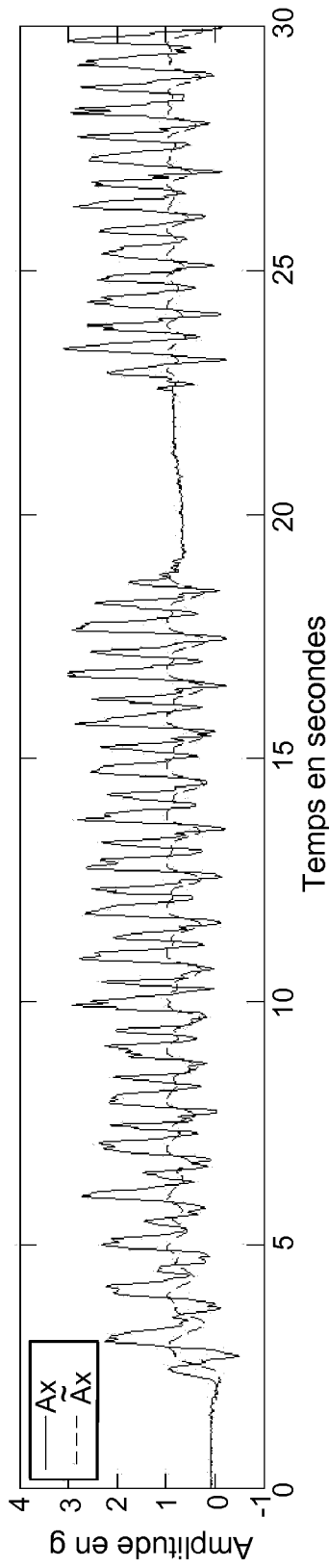


FIG.4a

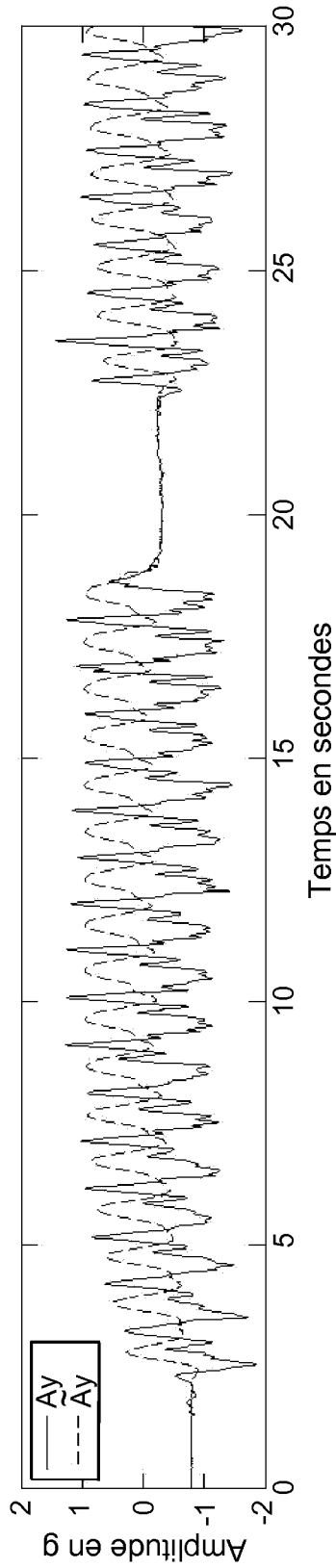


FIG.4b

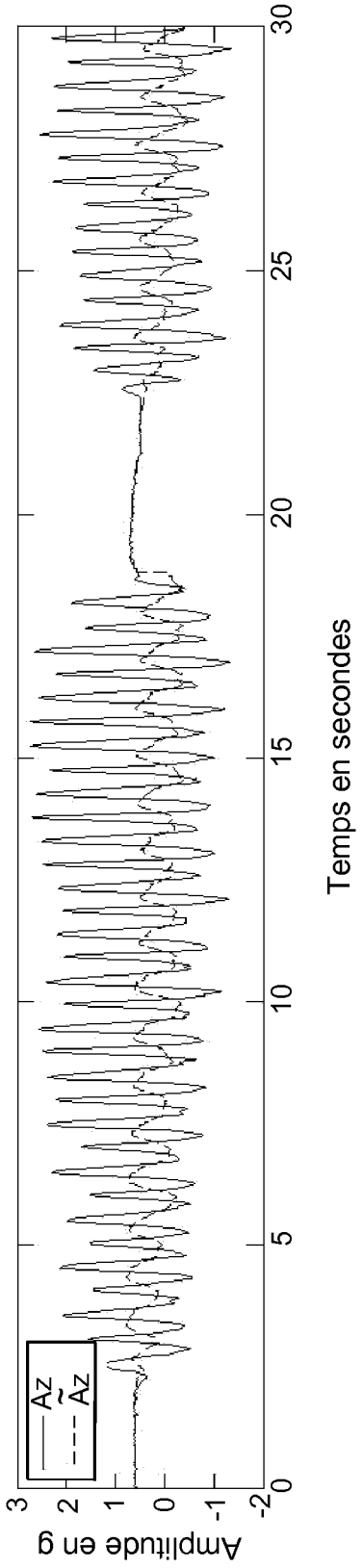


FIG.4c

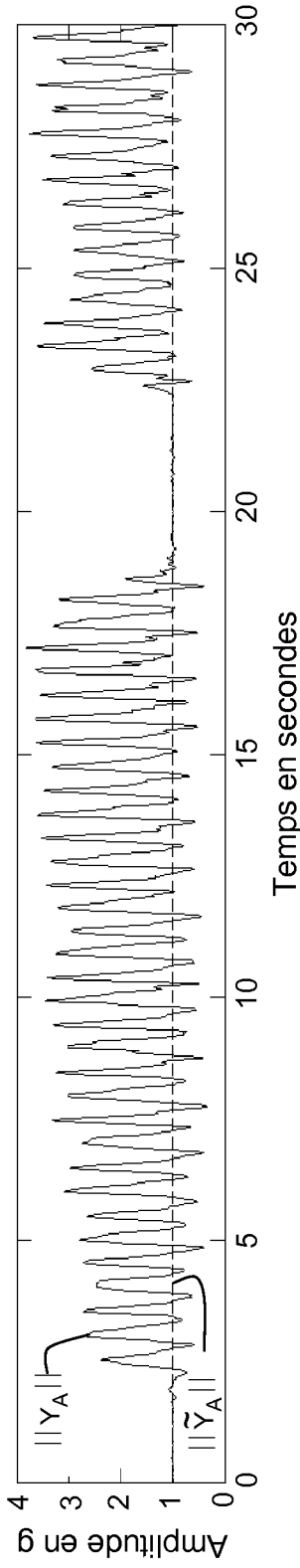


FIG.4d

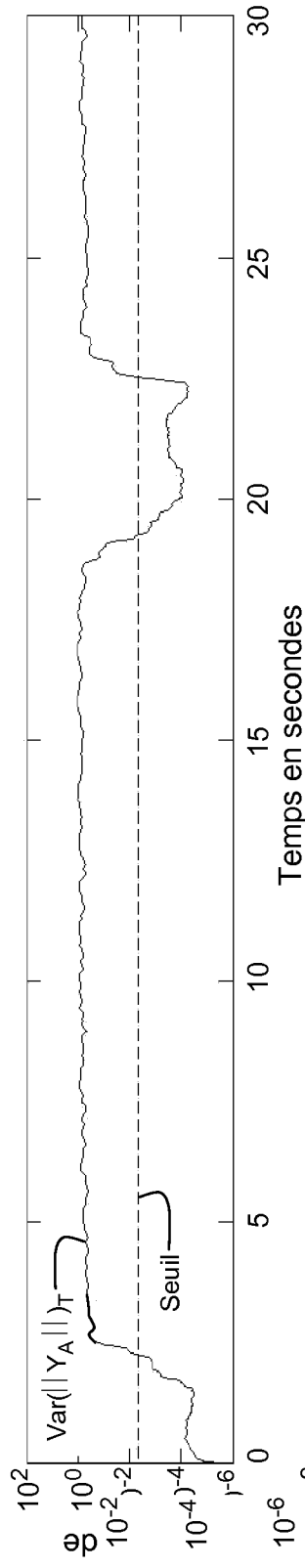


FIG.4e

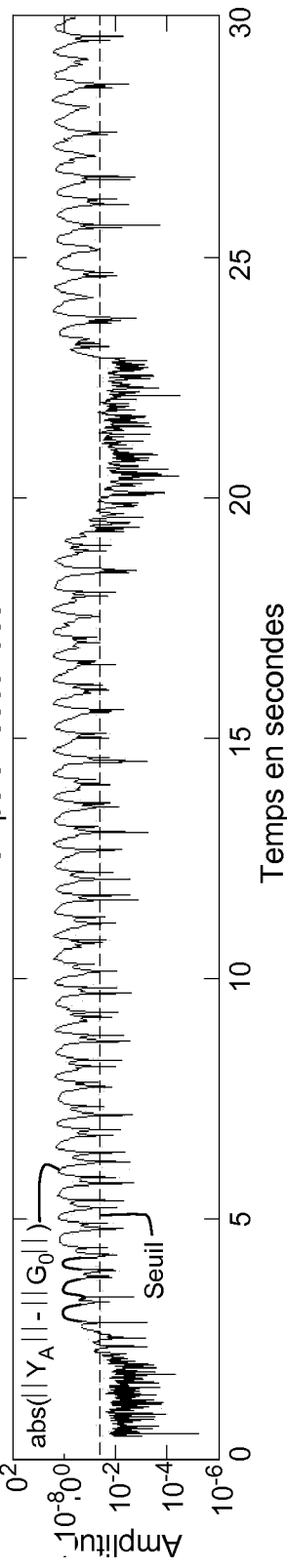


FIG.4f

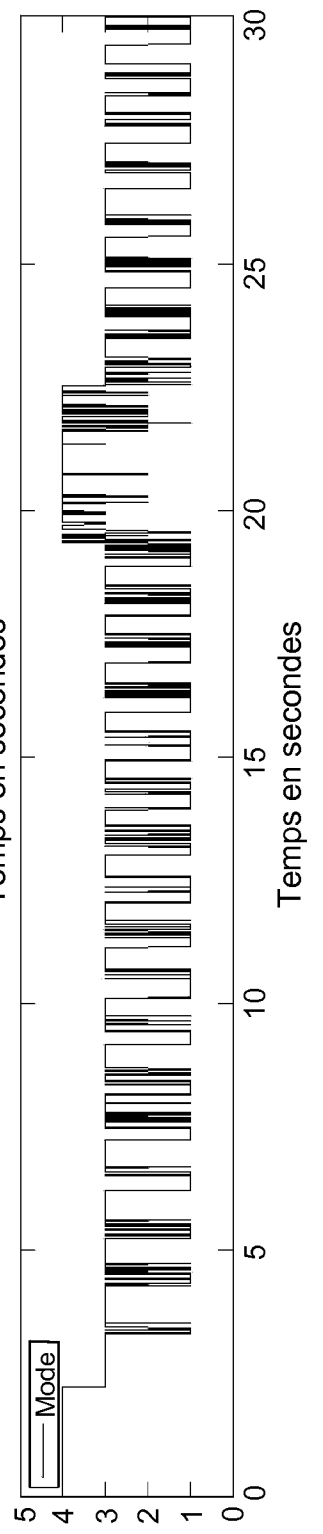


FIG.4g

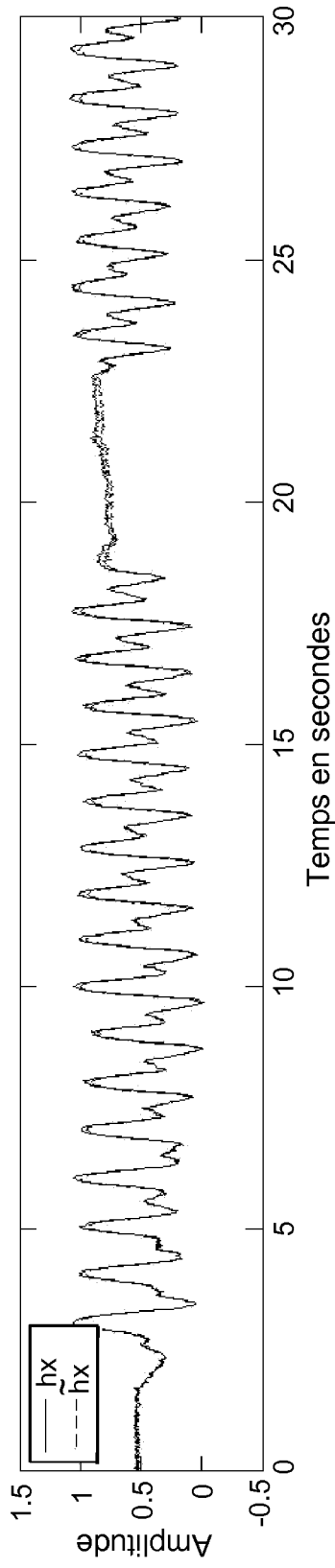


FIG.5a

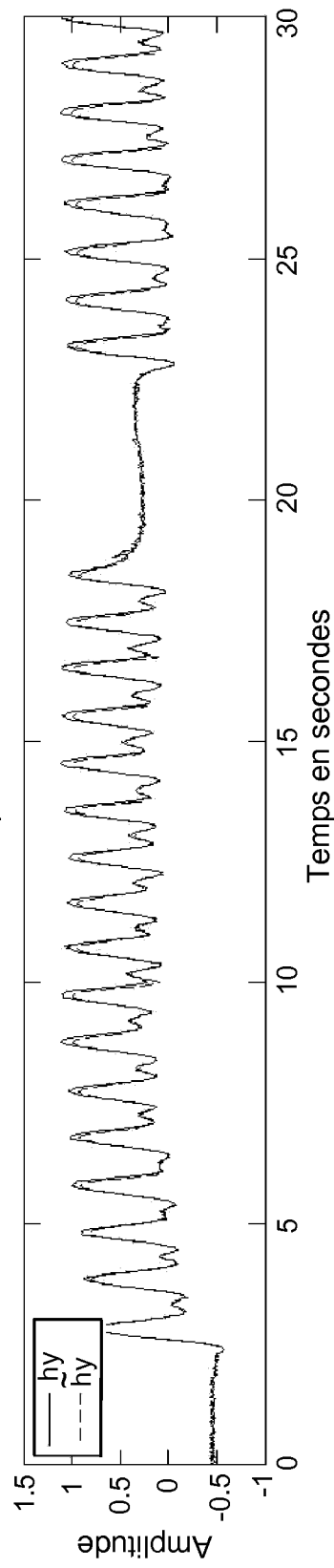


FIG.5b

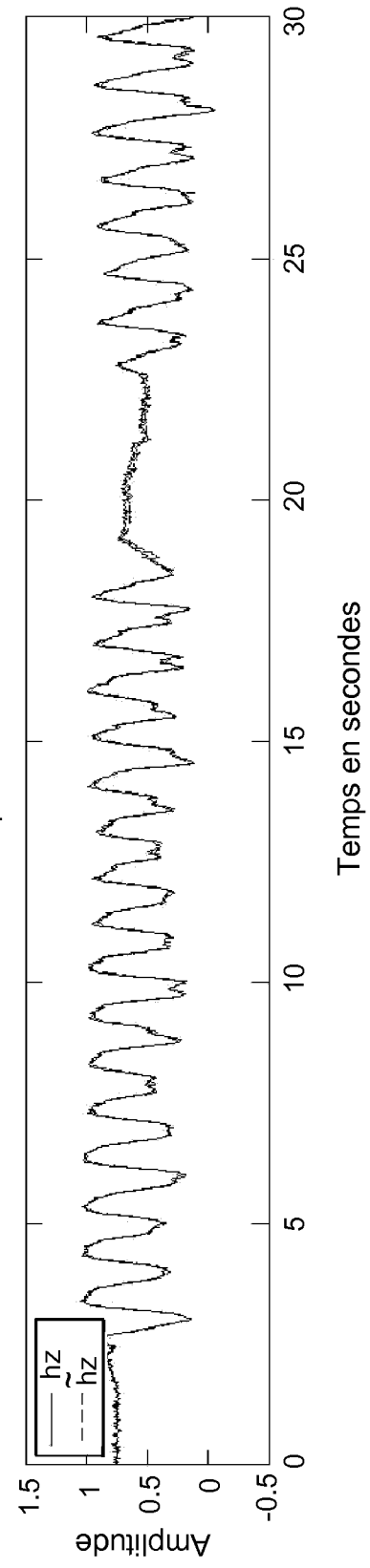


FIG.5c

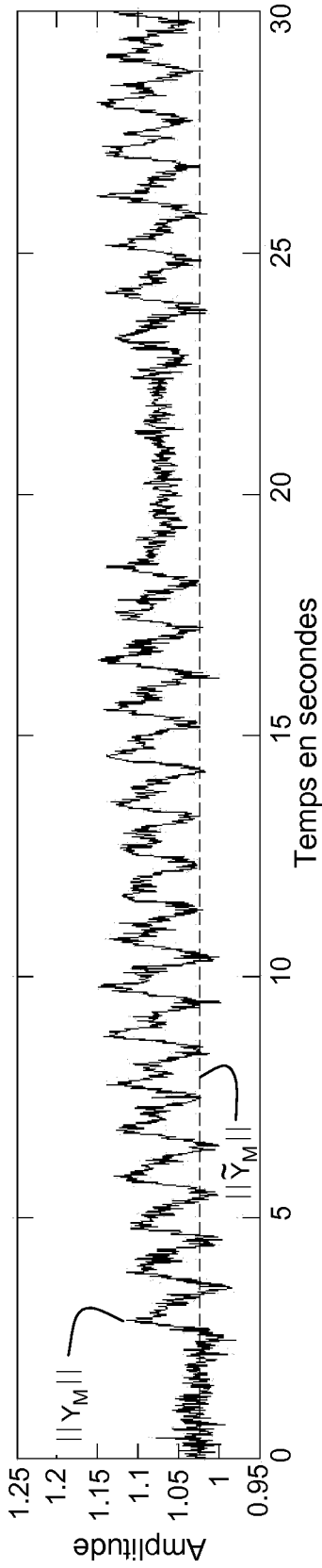


FIG. 5d

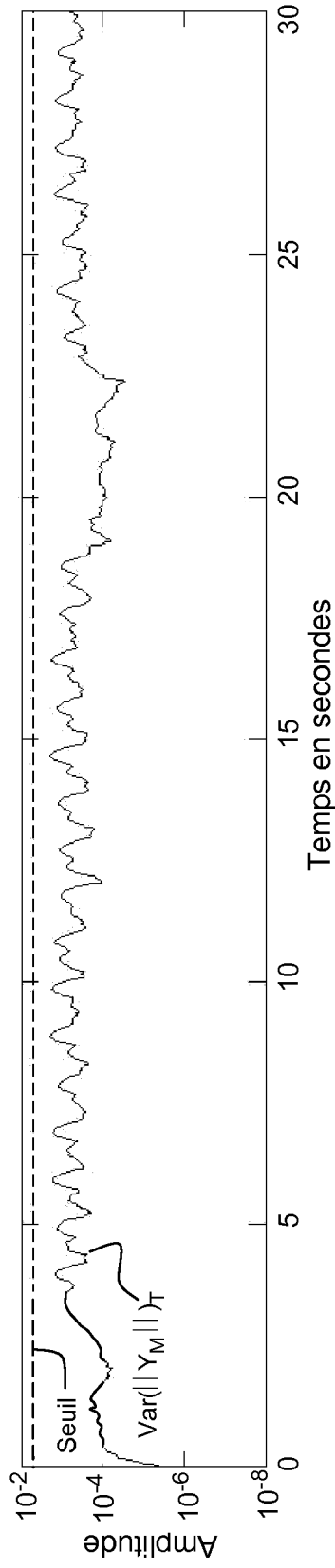


FIG. 5e

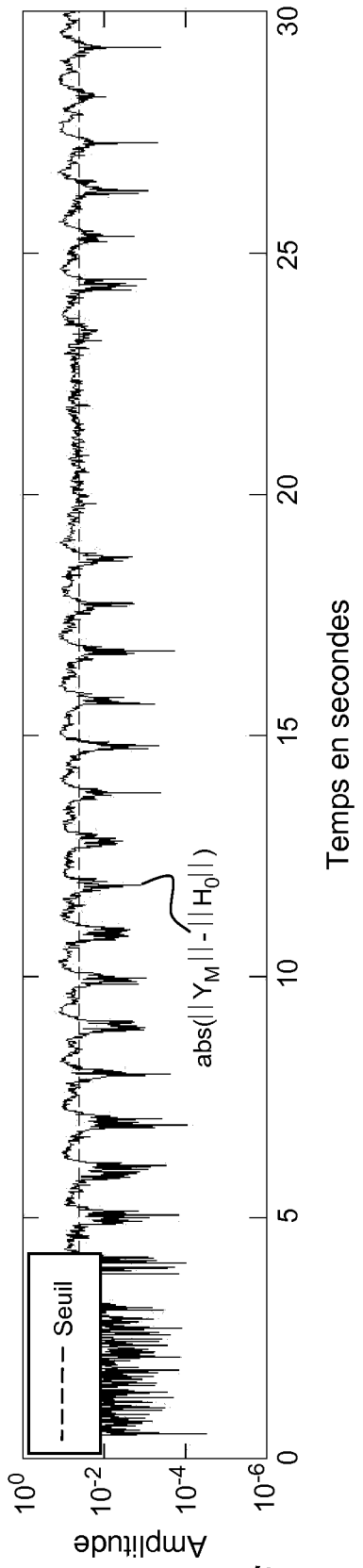


FIG. 5f

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/060792

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01C17/38 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.
A	WO 2009/127561 A1 (MOVEA S A [FR]; DE FORAS ETIENNE [FR]) 22 October 2009 (2009-10-22) cited in the application page 7, line 5 - line 24 page 10, line 4 - page 11, line 19 page 17, line 12 - page 20, line 4 figures 1,2	1-16
A	US 2010/250177 A1 (VAN ACHT VICTOR MARTINUS GERARDUS [NL] ET AL) 30 September 2010 (2010-09-30) paragraph [0007] - paragraph [0019] figure 2 ----- -/--	1-16

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	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"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
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 13 August 2012	Date of mailing of the international search report 23/08/2012
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 Yosri, Samir

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/060792

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>SABATINI A M: "Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA, vol. 53, no. 7, 1 July 2006 (2006-07-01), pages 1346-1356, XP002522559, ISSN: 0018-9294, DOI: 10.1109/TBME.2006.875664 cited in the application the whole document -----</p>	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2012/060792

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2009127561	A1	22-10-2009	EP 2268999 A1 05-01-2011
			FR 2930335 A1 23-10-2009
			US 2011035172 A1 10-02-2011
			WO 2009127561 A1 22-10-2009

US 2010250177	A1	30-09-2010	CN 101855517 A 06-10-2010
			EP 2210061 A2 28-07-2010
			JP 2011503571 A 27-01-2011
			US 2010250177 A1 30-09-2010
			WO 2009063400 A2 22-05-2009

<p>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01C17/38 G01C21/16 ADD.</p>		
<p>Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB</p>		
<p>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</p>		
<p>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01C</p>		
<p>Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche</p>		
<p>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</p>		
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</p>		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>WO 2009/127561 A1 (MOVEA S A [FR]; DE FORAS ETIENNE [FR]) 22 octobre 2009 (2009-10-22) cité dans la demande page 7, ligne 5 - ligne 24 page 10, ligne 4 - page 11, ligne 19 page 17, ligne 12 - page 20, ligne 4 figures 1,2</p>	1-16
A	<p>US 2010/250177 A1 (VAN ACHT VICTOR MARTINUS GERARDUS [NL] ET AL) 30 septembre 2010 (2010-09-30) alinéa [0007] - alinéa [0019] figure 2</p>	1-16
	----- -/--	
<p><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</p>		
<p><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</p>		
<p>* Catégories spéciales de documents cités:</p>		
<p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p>	<p>"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</p>	
<p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p>	<p>"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</p>	
<p>"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)</p>	<p>"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</p>	
<p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p>	<p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p>	
<p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p>		
<p>Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée</p>	<p>Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale</p>	
<p>13 août 2012</p>	<p>23/08/2012</p>	
<p>Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale</p>	<p>Fonctionnaire autorisé</p>	
<p>Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016</p>	<p>Yosri, Samir</p>	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>SABATINI A M: "Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA, vol. 53, no. 7, 1 juillet 2006 (2006-07-01), pages 1346-1356, XP002522559, ISSN: 0018-9294, DOI: 10.1109/TBME.2006.875664 cité dans la demande le document en entier -----</p>	1-16

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2012/060792

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2009127561 A1	22-10-2009	EP 2268999 A1	05-01-2011
		FR 2930335 A1	23-10-2009
		US 2011035172 A1	10-02-2011
		WO 2009127561 A1	22-10-2009

US 2010250177 A1	30-09-2010	CN 101855517 A	06-10-2010
		EP 2210061 A2	28-07-2010
		JP 2011503571 A	27-01-2011
		US 2010250177 A1	30-09-2010
WO 2009063400 A2	22-05-2009		
