

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
12 juillet 2007 (12.07.2007)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2007/077346 A2**

(51) Classification internationale des brevets :  
**G01C 21/16** (2006.01) **G01C 17/30** (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2006/002831

(22) Date de dépôt international :  
21 décembre 2006 (21.12.2006)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
0513269 23 décembre 2005 (23.12.2005) FR

(71) **Déposants** (pour tous les États désignés sauf US) : **COM-MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Immeuble "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR). **INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE** [FR/FR]; 46, avenue Félix-Viallet, F-38031 Grenoble (FR). **UNIVERSITE JOSEPH FOURIER** [FR/FR]; 621, avenue Centrale, Domaine Universitaire de Saint Martin Hères, BP 53, F-38041 Grenoble Cedex 09 (FR).

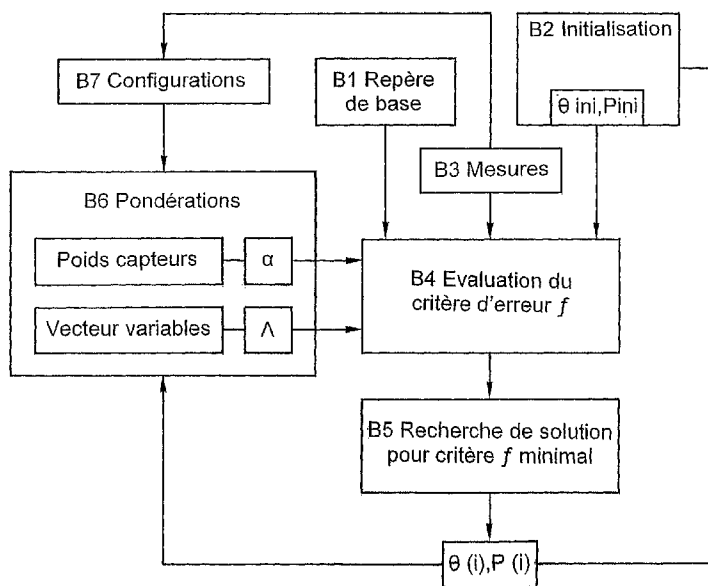
(72) **Inventeurs; et**

(75) **Inventeurs/Déposants** (pour US seulement) : **CARITU, Yanis** [FR/FR]; La Cote, F-38134 Saint Joseph de Rivière (FR). **GODIN, Christelle** [FR/FR]; 6 Allée des Lauriers, F-38190 Brignoud (FR). **BARRAUD, Alain** [FR/FR]; Les

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR ESTIMATING MOVEMENT OF A SOLID

(54) Titre : PROCEDE D'ESTIMATION D'UN MOUVEMENT D'UN SOLIDE



B1 BASIC MARK  
B2 INITIALIZATION  
B3 MEASUREMENTS  
B4 EVALUATING ERROR CRITERION F  
B5 FINDING SOLUTION FOR MINIMUM CRITERION F  
B6 WEIGHTS: SENSOR WEIGHT, VARIABLE VECTOR  
B7 CONFIGURATIONS

pondération (B6) du vecteur à

(57) **Abstract:** The invention concerns a method whereby a solid mobile in a medium capable of generating disturbances defined by a three-variable vector, wherein the movement is defined by a six-variable vector and the solid is equipped with at least one sensor sensitive to acceleration having at least three sensitive axes and at least one sensor sensitive to the magnetic field having at least three sensitive axes. The inventive method for estimating the movement of a solid includes a step (B6) of calculating a nine-variable vector ( $\Lambda$ ) consisting of six-variable movement vector and of the three-variable disturbance vector and a step of weighting (B6) the nine-variable vector ( $\Lambda$ ) capable of transforming the nine-variable vector into a vector with not more than five variables to be estimated.

(57) **Abrégé :** Un solide est mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations définies par un vecteur à trois variables, le mouvement du solide étant défini par un vecteur à six variables et le solide étant équipé d'au moins un capteur sensible à l'accélération ayant au moins trois axes de sensibilité et d'au moins un capteur sensible au champ magnétique ayant au moins trois axes de sensibilité. Un procédé d'estimation du mouvement du solide comprend une étape d'élaboration (B6) d'un vecteur à neuf variables ( $\Lambda$ ) constitué du vecteur de mouvement à six variables et du vecteur de perturbations à trois variables et une étape de

[Suite sur la page suivante]

WO 2007/077346 A2



Bois, 2 route des Jaures, F-38190 Froges (FR). **LESECQ, Suzanne** [FR/FR]; Les Bois, 2 route des Jaures, F-38190 Froges (FR).

(74) **Mandataire : SANTARELLI**; 14, Avenue de la Grande-Armée, B.P. 237, F-75822 Paris Cedex 17 (FR).

(81) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, 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, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, 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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Déclaration en vertu de la règle 4.17 :**

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

**Publiée :**

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

"Procédé d'estimation d'un mouvement d'un solide"

5           La présente invention concerne un procédé d'estimation d'un mouvement d'un solide.

De manière générale, la présente invention concerne le domaine des centrales d'attitude permettant de connaître la position d'un solide dans l'espace.

10           Une centrale d'attitude est composée d'accéléromètre et de magnétomètres et est adaptée à mettre en œuvre un traitement permettant de restituer l'orientation dans l'espace d'un solide porteur de la centrale d'attitude.

On connaît en particulier un tel dispositif dans le document français FR 02 04260.

15           Le dispositif décrit dans ce document permet d'obtenir une estimation des angles de rotation du solide à 360° et d'être complètement autonome vis-à-vis du milieu dans lequel se déplace le solide.

Par ailleurs, une telle centrale d'attitude ne nécessite pas l'utilisation de gyromètre, ce qui permet de diminuer le coût du dispositif et son encombrement.

La centrale d'attitude décrite dans le document FR 02 04260 permet de prendre en compte l'orientation du solide comme inconnue dans le modèle de mesure et le traitement des signaux provenant de la centrale d'attitude.

25           Or, lorsque l'accélération du mouvement du solide devient importante devant l'accélération de la pesanteur, les angles estimés sont entachés d'erreur puisque l'accélération due au mouvement du solide est associée à l'accélération due à la pesanteur.

Par ailleurs, le milieu même dans lequel le solide évolue peut générer des perturbations magnétiques qui ne sont pas prises en compte par la centrale d'attitude de l'état de la technique.

30           La présente invention a pour but de résoudre les inconvénients précités et de proposer un procédé d'estimation du mouvement d'un solide, mis

en œuvre dans une telle centrale d'attitude, permettant par rapport au procédé décrit dans le document FR 02 04 260, d'améliorer les performances en terme d'estimation de données utiles, de coût calculatoire et de précision et robustesse des résultats.

5           A cet effet, la présente invention vise un procédé d'estimation du mouvement d'un solide mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations définies par un vecteur à trois variables, le mouvement étant défini par un vecteur à six variables et ledit solide étant équipé d'au moins un capteur sensible à l'accélération ayant au moins trois axes de sensibilité et d'au  
10 moins un capteur sensible au champ magnétique ayant au moins trois axes de sensibilité.

Selon l'invention, le procédé d'estimation comprend une étape d'élaboration d'un vecteur à neuf variables constitué dudit vecteur de mouvement à six variables et dudit vecteur de perturbations à trois variables, et  
15 une étape de pondération dudit vecteur à neuf variables adapté à transformer ledit vecteur à neuf variables en un vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer.

Le procédé d'estimation conforme à l'invention permet ainsi de prendre en compte non seulement l'orientation du solide dans le champ  
20 terrestre magnétique et gravitationnel, mais aussi l'accélération due au mouvement, ainsi que les perturbations, telles que des perturbations magnétiques intervenant dans le milieu dans lequel se déplace le solide, grâce à l'introduction de nouveaux paramètres représentés par le vecteur à neuf variables.

25           La Demanderesse a constaté que selon les conditions de mouvement du solide et du milieu dans lequel il évolue, il est possible de pondérer le vecteur à neuf variables en supposant connues au moins quatre variables de ce vecteur.

Grâce aux capteurs d'accélération et aux capteurs sensibles au  
30 champ magnétique ayant chacun trois axes de sensibilité, il est possible de déterminer cinq variables inconnues du vecteur ainsi pondéré.

Grâce à cette estimation du mouvement d'un solide qui permet non seulement de connaître l'orientation d'un solide mais également l'accélération ou les perturbations du milieu, il est possible d'utiliser le solide ainsi équipé de la centrale d'attitude et mettant en œuvre le procédé d'estimation conforme à  
5 l'invention de manière élargie.

En particulier, il est possible de capturer des mouvements plus rapides et d'utiliser le solide dans des applications pour lesquelles sont requises de la précision et une stabilité des mesures.

Il est également possible d'estimer la position en translation du solide  
10 par rapport à une position de départ.

En pratique, le procédé d'estimation comprend une étape de choix d'une configuration de mouvements parmi une table de configuration des mouvements, et l'étape de pondération est adaptée à remplacer une variable inconnue par une valeur connue dans le vecteur à neuf variables en fonction de  
15 la configuration choisie.

En effet, dans une application donnée, le mouvement du solide est rarement libre dans l'espace. En particulier, lorsque le solide est mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations magnétiques, la configuration du mouvement peut être choisie parmi un ensemble de configuration de  
20 mouvement comprenant notamment un mouvement dans un milieu sans perturbations magnétiques, un mouvement dans un espace à une seule dimension, un mouvement dans un plan et un mouvement ayant au moins deux degrés de liberté connus.

En pratique, l'étape de pondération comprend une étape de choix  
25 d'un vecteur de poids adapté à modifier le poids respectif des capteurs équipant le solide et le procédé comprend une étape d'estimation d'au moins une variable du vecteur à neuf variables, à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure d'au moins un capteur associé.

Ainsi, un vecteur de poids permet d'ignorer certains capteurs selon  
30 certains ou tous ses axes de sensibilité de telle sorte qu'il est possible de déterminer uniquement certaines variables à estimer.

Avantageusement, le procédé d'estimation comprend au moins une étape de réitération des étapes de choix d'un vecteur de pondération et d'estimation d'au moins une variable du vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer, le vecteur de poids choisi à ladite étape de choix étant  
5 différent à chaque étape de réitération.

En réalisant ainsi plusieurs passes et en modifiant la configuration du vecteur de poids, il est possible d'estimer alternativement les différentes variables du vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer.

Selon un mode de réalisation pratique de l'invention, le procédé  
10 d'estimation comprend une étape de choix d'un vecteur de poids adapté à ignorer la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération, une étape d'estimation d'au moins deux variables du vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique, une étape de choix d'un vecteur de poids adapté à ignorer  
15 la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique et une étape d'estimation d'au plus les trois autres variables dudit vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération.

Ainsi, en ignorant dans un premier temps la mesure des capteurs  
20 sensibles à l'accélération, il est possible de déterminer des angles dans l'espace correspondant à l'orientation du solide grâce au capteur sensible au champ magnétique qui n'est pas sensible à l'accélération du solide.

Une fois ces angles estimés, il est alors possible d'estimer les autres variables, et par exemple un troisième angle et deux accélérations du solide, à  
25 partir du ou des capteurs sensibles à l'accélération.

Alternativement, le procédé d'estimation comprend une étape de choix d'un vecteur de poids adapté à ignorer la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique, une étape d'estimation d'au moins deux variables dudit vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de  
30 la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération, une étape de choix d'un vecteur de poids adapté à ignorer les capteurs sensibles à l'accélération et une étape d'estimation d'au plus les trois autres variables dudit vecteur à au

plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique.

En pratique, afin de diminuer les difficultés en terme de temps des calculs, lorsque le vecteur à neuf variables comprend un vecteur de rotation à trois degrés de liberté, le vecteur de rotation est représenté par quatre composantes d'un quaternion associé à une contrainte sur les quatre composantes du quaternion.

L'utilisation du symbolisme du quaternion permet d'aboutir à des fonctions quadratiques plus simples à résoudre que les fonctions trigonométriques qui donnent un caractère non linéaire particulier aux équations à résoudre pour déterminer les cinq variables du vecteur permettant d'estimer le mouvement du solide.

En pratique, à l'étape d'estimation d'au moins une variable dudit vecteur à au plus cinq variables à estimer, la contrainte des composantes du quaternion est intégré dans la représentation du vecteur de rotation.

Selon un mode pratique de l'invention, à l'étape d'estimation d'au moins une variable du vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer, une fonction de minimisation d'erreurs de type quasi Newton est utilisée.

Selon un second aspect de l'invention, elle concerne un dispositif d'estimation du mouvement d'un solide d'un mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations définies par un vecteur à trois variables, ledit mouvement étant défini par un vecteur à six variables.

Le dispositif d'estimation est monté sur ledit solide et comprend au moins un capteur sensible à l'accélération ayant au moins trois axes de sensibilité et au moins un capteur sensible au champ magnétique ayant au moins trois axes de sensibilité.

Ce dispositif d'estimation est adapté à mettre en œuvre le procédé d'estimation du mouvement d'un solide conforme à l'invention.

Le dispositif d'estimation du mouvement d'un solide présente des caractéristiques et avantages analogues à ceux décrits précédemment en relation avec le procédé conforme à l'invention.

D'autres particularités et avantages de l'invention apparaîtront encore dans la description ci-après.

Aux dessins annexés, donnés à titre d'exemples non limitatifs :

- la figure 1 est un schéma illustrant le mouvement d'un solide qui  
5 peut être estimé par le procédé d'estimation du mouvement conforme à l'invention ;

- les figures 2A, 2B, 2C sont des représentations schématiques de dispositifs d'estimation du mouvement d'un solide conformes à trois modes de réalisation de l'invention ; et

10 - la figure 3 est un schéma synoptique illustrant le procédé d'estimation du mouvement d'un solide conforme à l'invention.

On va d'abord décrire en référence à la figure 1 le type de mouvement d'un solide estimé par le procédé conforme à l'invention.

L'objectif est de reconstruire au cours du temps l'orientation et la  
15 dynamique, c'est-à-dire l'accélération d'un solide mobile qui embarque un dispositif de mesure. Par voie de conséquence, on pourra estimer également la trajectoire (intégrale double de l'accélération).

Le solide mobile est ici considéré comme ponctuel et est repéré par une position M comme indiquée sur la figure 1. Son orientation est repérée par  
20 le vecteur  $\theta$ , qui correspond à l'orientation d'un repère R dans un repère fixe Ro (qui peut être un repère initial dans une phase de repos au point 0).

En outre, à tout instant, l'accélération propre au mouvement est notée  $a$ . Le dispositif de mesure est sensible également à l'accélération de la pesanteur notée  $G_0$  et au champ magnétique terrestre ambiant noté  $H_0$  (champ  
25 magnétique mesuré au repos). D'éventuelles perturbations magnétiques au point de site du mobile ajoutent une contribution magnétique notée  $b$ .

Ici, à titre d'exemples non limitatifs, l'axe Z du repère fixe Ro est aligné avec la verticale et donc avec  $G_0$ .

Selon le principe de Galilée-Einstein, l'accélération mesurable  
30 résultante en M est l'accélération non gravitationnelle, c'est-à-dire, proportionnelle à :  $a - G_0$ .

Le champ magnétique mesurable résultant en M est :  $H_0 + b$ .



Le mouvement du solide est défini par un vecteur à six variables correspondant au mouvement propre du solide. Trois premières variables correspondent à trois dimensions en rotation, c'est-à-dire à l'orientation repérée par le vecteur  $\theta$ .

5           Trois autres variables correspondent à la position du solide dans le repère R, correspondant ainsi aux coordonnées X, Y, Z dans le repère R. Ces coordonnées peuvent être déduites par intégrale double du vecteur d'accélération  $a$  du mobile qui sera ainsi choisi comme variable du mouvement.

10           En outre, compte tenu du milieu dans lequel évolue le solide, celui-ci peut être défini par un vecteur à trois variables représentant d'éventuelles perturbations magnétiques  $b$ .

De manière générale, neuf variables permettent de décrire le système observé en mouvement dans son environnement.

15           Ainsi, lorsque le solide est dans une position initiale au repos, on peut définir un vecteur  $P_0$  tel que :

$$P_0 = (G_0, H_0), \text{ avec :}$$

- $G_0$  de dimension 3 correspondant à l'accélération de la pesanteur,
- $H_0$  de dimension 3 correspondant au magnétisme terrestre,
- $(M, R) \equiv (O, R_0)$  et
- 20           - vecteur  $\theta = 0$

Lorsque le solide entre en mouvement, un vecteur  $p$  est ajouté au vecteur initial  $P_0$ .

Le vecteur  $p$  est défini comme suit  $p = (a, b)$ , où  $a$  et  $b$  sont des vecteurs de dimension 3.

25           Le champ total mesuré par le dispositif de mesure correspond ainsi à la somme des vecteurs  $P_0 + p$ .

On obtient ainsi un vecteur à neuf variables définissant le mouvement du solide dans lequel les inconnues sont les angles du vecteur  $\theta$ , l'accélération  $a$  du solide et la perturbation magnétique  $b$ .

30           On va décrire à présent en référence aux figures 2A, 2B et 2C différents modes de réalisation d'un dispositif d'estimation du mouvement conforme à l'invention.

Le dispositif d'estimation est constitué uniquement de magnétomètres et d'accéléromètres. Il est monté sur le solide dont on souhaite estimer le mouvement.

Comme illustré sur la figure 2A, le dispositif d'estimation du mouvement doit comporter au moins un capteur d'accélération  $C_a$  ayant au moins trois axes de sensibilité  $V_1, V_2, V_3$  et au moins un capteur sensible au champ magnétique  $C_m$  ayant également trois axes de sensibilité  $V_4, V_5, V_6$ .

Selon un autre mode de réalisation, comme illustré sur la figure 2B, chaque capteur  $C_a$  et  $C_m$  peut comporter respectivement quatre axes de sensibilité de telle sorte que le capteur d'accélération  $C_a$  comporte les axes de sensibilité  $V'_1, V'_2, V'_3, V'_4$  et le capteur sensible au champ magnétique  $C_m$  comporte les axes de sensibilité  $V'_5, V'_6, V'_7, V'_8$ .

De même, afin de fiabiliser les mesures comme illustré à la figure 2C, le dispositif d'estimation peut comporter deux capteurs d'accélération  $C''_a$  ayant chacun trois axes de sensibilité  $V''_1, V''_2, V''_3, V''_4, V''_5, V''_6$  et deux capteurs sensibles au champ magnétique  $C''_m$  ayant chacun trois axes de sensibilité  $V''_7, V''_8, V''_9, V''_{10}, V''_{11}$  et  $V''_{12}$ .

En pratique, le dispositif d'estimation conforme à l'invention doit comporter au moins autant d'axes sensibles que de paramètres inconnus à estimer dans le mouvement du solide équipé du dispositif.

Par ailleurs, selon le type de variables à estimer, certains capteurs ne doivent pas être manquants. En particulier, il n'est pas possible d'estimer correctement un angle d'azimut horizontal sans magnétomètre dont la projection dans le plan horizontal n'est pas nulle.

Par ailleurs, plus il existe d'axes sensibles selon différentes directions, meilleure sera l'estimation des paramètres puisque le rapport signal à bruit est augmenté. Toutefois, le dispositif d'estimation présente un coût directement dépendant du nombre de capteurs d'accélération ou sensibles au champ magnétique utilisé.

En pratique, les deux systèmes d'axes de mesure  $V_1, V_2, V_3$  et  $V_4, V_5, V_6$  sont confondus en un même point. Pour des raisons de clarté, ils sont séparés spatialement sur les figures 2A, 2B, 2C.

En pratique, il n'est pas possible de superposer les capteurs  $C_a$  et  $C_m$  en un même point mais l'erreur introduite est faible si on utilise des microcapteurs.

Chaque type de capteur accéléromètre ou magnétomètre se suffit de  
5 trois axes sensibles non alignés. Au-delà, selon un résultat bien connu en traitement du signal, c'est le rapport signal à bruit qui se trouve augmenté et mieux réparti sur la plage de fonctionnement.

On va décrire à présent en référence à la figure 3 le procédé d'estimation du mouvement d'un solide conforme à l'invention.

10 Le procédé comporte tout d'abord une étape de définition B1 du repère de base  $R_0$  qui peut être un repère fixe défini par ses coordonnées géophysiques telles que la latitude ou la longitude ou encore de manière relative en considérant qu'il s'agit de la position du solide à un moment initial  $t=0$ .

15 La position du repère mobile  $R_0$  correspond ainsi aux mesures initiales données par les capteurs  $V(t)$  avec  $t=0$ .

Comme décrit précédemment, à cette position initiale est affectée un champ magnétique terrestre  $H_0$  et une accélération due à la pesanteur  $G_0$ .

Une étape d'initialisation B2 est également mise en œuvre afin de  
20 définir les valeurs initiales à un instant  $T=0$  du vecteur de rotation  $\theta$  et du vecteur de perturbation  $p$ .

Une étape de mesure B3 est ensuite mise en œuvre à chaque instant afin de réaliser une mesure  $V(t)$ .

On va décrire à présent le principe général du traitement de cette  
25 mesure.

La mesure  $V(t)$  est une représentation du champ physique complet  $P_0+p$  dans le repère des capteurs. Afin d'exprimer les neuf variables inconnues dues au mouvement et aux perturbations magnétiques dans le repère fixe  $R_0$ , les opérations nécessaires successives pour obtenir la mesure à partir du  
30 champ physique  $P_0+p$  (exprimé dans le repère  $R_0$ ) sont les suivantes :

- expression de la rotation  $\theta$  du repère fixe dans le repère mobile,
- projection du champ  $P_0+p$  sur le repère mobile,

- projection du résultat dans le repère sensible orienté  $\theta_j$  connu et attaché au repère mobile (cette opération disparaît pour les capteurs dont les axes coïncident avec ceux du repère mobile choisi).

L'expression de la mesure théorique (ou modèle de mesure) en fonction du champ est donc de la forme :

$$V_{\text{mod}}(j) = \text{proj}_{\theta_j}[R_{\theta}(Po + p)]$$

La fonction inverse directe n'est pas explicite dans le cas général et on a recours, à une étape d'évaluation B4, à des méthodes de minimisation d'erreur, le critère à minimiser étant le suivant :

$$f(\theta, p) = \sum_{j=1}^{Na+Nb} \alpha_j (V_{\text{mod}}(j) - V(j))^2$$

où le nouveau paramètre  $\alpha_j$  représente une pondération de la contribution du capteur selon un axe de sensibilité  $j$  et  $Na+Nb$  correspond au nombre total d'axes de sensibilité des capteurs sensibles au champ magnétique et à l'accélération.

Le vecteur  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{Na+Nb})$  est de dimension  $Na+Nb$  et permet de pondérer la mesure des capteurs selon leurs différents axes de sensibilité. À titre d'exemple, pour une boussole compensée en inclinaison, l'utilisation de la mesure selon deux axes de l'accéléromètre donne une inclinaison par rapport à la verticale et l'utilisation de la mesure selon quatre axes du magnétomètre donne l'angle dans le plan incliné.

Ce vecteur de pondération  $\alpha$  peut être imposé par l'utilisateur ou mis à jour de façon adaptive selon des critères de confiance qu'on accorde à la mesure selon les axes de sensibilité des différents capteurs :

$\alpha_j = 1$  : confiance,

$\alpha_j = 0$  : mise hors jeu de la mesure donnée par un capteur selon l'axe de sensibilité  $j$ .

Entre ces deux valeurs extrêmes, on peut exprimer plus ou moins de contribution de l'information de mesure.

Par exemple, si le capteur est plus bruité que les autres, on choisira un coefficient de pondération inversement proportionnel à la variance.

La formulation de la fonction de rotation  $\theta$  peut être exprimée par une composition de matrice (fonction trigonométrique) dans un système particulier (Euler, Cardan, ...) ou encore par les quaternions (fonction quadratique) dont l'utilisation sera décrite ci-après.

- 5 Dans tous les cas, le modèle de mesure s'exprime de manière affine en fonction de l'inconnue  $p$  :

$V_{\text{mod}}(j) = A(\theta) \times p + B(\theta)$  où  $A(\theta)$  et  $B(\theta)$  sont des fonctions du vecteur  $\theta$ .

- 10 Le procédé de traitement doit aboutir à fournir une optimisation de  $(\theta, p)$  tel que le critère  $f$  soit minimal. On cherche ainsi à l'étape de calcul B5 à résoudre la fonction :

$$\min_{(\theta, p)} f(\theta, p) = \min_{\theta} \left\{ \min_p (f(\theta, p)) \right\}$$

La résolution en  $p$  étant linéaire, la solution des moindres carrés en  $p$  est une solution explicite.

- 15 De préférence, une fonction de minimisation d'erreurs de type quasi Newton est utilisée.

Le vecteur de rotation à trois degrés de liberté peut être représenté par quatre composantes d'un quaternion associé à une contrainte sur ces quatre composantes, de manière à simplifier les calculs.

- 20 En effet, l'expression mathématique classique pour le vecteur de rotation est celle des matrices d'angles. L'expression finale comporte un grand nombre de fonctions trigonométriques qui donne un caractère non linéaire particulier au critère et qui pose des difficultés en terme de temps de calcul.

- 25 On préférera utiliser le symbolisme des quaternions qui permet d'aboutir à des fonctions quadratiques. Les trois degrés d'orientation sont alors représentés par quatre composantes :

$$q = (q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3) \text{ avec :}$$

$$q_0 = \cos(x_1)$$

$$q_1 = \sin(x_1) u_x$$

30  $q_2 = \sin(x_1) u_y$

$$q_3 = \sin(x_1) u_z$$

avec  $u$  les coordonnées de l'axe de rotation. Ces quatre composantes répondent, dans le cas où ils représentent une rotation, à la contrainte :

$$\sum q_i^2 = 1$$

- 5 En outre, à l'étape de calcul B5, afin d'éviter d'utiliser des méthodes d'optimisation avec contrainte, on pourra utiliser une "contrainte intégrée" dans le vecteur de rotation :

- soit en considérant tous les cas possibles suivants :

$$u = \frac{1}{\sqrt{1+x_2^2+x_3^2}} \begin{pmatrix} 1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \text{ ou } u = \frac{1}{\sqrt{1+x_2^2+x_3^2}} \begin{pmatrix} x_1 \\ 1 \\ x_3 \end{pmatrix} \text{ ou } \dots$$

- 10 - soit en exprimant l'axe de rotation en coordonnées sphériques :

$$q = \begin{pmatrix} \cos(x_1) \\ \sin(x_1)u \end{pmatrix} \text{ et } u = \begin{pmatrix} \cos(x_2)\cos(x_3) \\ \sin(x_2)\cos(x_3) \\ \sin(x_3) \end{pmatrix}$$

- Conformément à l'invention, afin de faciliter la résolution des critères à minimiser  $f$  tels que décrits précédemment, on met en œuvre une étape de pondération B6 permettant de pondérer le vecteur à neuf variables pour transformer celui-ci en un vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer.

Ce vecteur de pondération dépend en particulier du choix d'une configuration de mouvement réalisée à une étape de choix d'une configuration B7 parmi une table de configuration de mouvement.

- De préférence, cette étape de choix d'une configuration B7 est réalisée automatiquement au moins dans des cas classiques d'utilisation du dispositif.

On notera par la suite les neuf variables de la manière suivante :

$$(\theta = \theta_0 \theta_1 \theta_2, p = a_0 a_1 a_2 \ b_0 b_1 b_2)$$

et le vecteur des variables d'un système :

$$25 \quad \Lambda = (\dots \theta_{i1} \dots \tilde{\theta}_{i2} \dots \dots i_1, i_2 \in \{0,1,2\}, \tilde{a}_{j1} \dots a_{j2} \dots \dots j_1, j_2 \in \{0,1,2\}, \tilde{b}_{k1} \dots b_{k2} \dots \dots k_1, k_2 \in \{0,1,2\})$$

Avec :

- la notation Xi indique une variable inconnue à trouver

- la notation "-" indique que le problème ne dépend pas de cette variable (cas où certains capteurs ne sont pas pris en compte)
- la notation  $\tilde{x}_i$  indique une valeur connue mise en lieu et place de la variable.

5           On va décrire à présent le cas particulier de pondération de ce vecteur  $\Lambda$  lorsque des perturbations magnétiques sont nulles ou connues.

Ce cas de figure regroupe toutes les applications dans lequel le mobile n'évolue pas dans un environnement magnétique terrestre perturbé par des masses ferromagnétiques intruses et inconnues.

10           Tel est le cas notamment d'une personne réalisant des gestes sportifs sur un stade ou dans une salle, éloignée d'au moins un mètre d'appareils en acier.

Ce cas d'application se retrouve également lorsqu'un mobile est dans une situation dans laquelle on sait prédire les perturbations magnétiques,  
15 par exemple lorsque le capteur est solidaire d'un objet ferromagnétique dont on connaît les caractéristiques physiques (capteur dans un téléphone portable, batterie, carrosserie de voiture, véhicules en tout genre, ...).

A l'étape de choix d'une configuration B7, il est possible de connaître à l'avance ou de prédire la configuration du mouvement.

20           Les variables liées à la perturbation magnétique étant nulles ou connues, les six variables inconnues correspondent au vecteur de mouvement du solide.

Il est nécessaire de connaître une de ces variables parmi l'orientation et/ou l'accélération du solide.

25           L'étape de choix d'une configuration B7 permet également en fonction du type de mouvement, de déterminer à l'avance une de ces variables.

A titre d'exemple, si le capteur est mis sur une structure comme un membre d'une personne ou un bras de robot, les degrés de liberté angulaires sont souvent strictement inférieurs à trois, comme dans le cas des articulations  
30 pour l'homme (coude, genou, cheville, poignet) ou un moteur de rotation pour les bras de robot (1 ou 2 moteurs à l'articulation).

De même, pour un système sur suspension comme un véhicule sur  
roue, les ressorts permettent dans de bonnes conditions d'adhérence un  
mouvement de tangage et de roulis, c'est-à-dire, avec deux angles de rotation,  
le troisième correspondant au cap pouvant être donné par un autre système,  
5 par exemple un GPS.

De même au niveau de l'accélération, il est possible de connaître à  
l'avance l'une des variables, notamment lorsque le mouvement de translation  
est accéléré dans un plan, tel que cela est le cas pour un véhicule sur la route,  
ou un train, auquel cas l'accélération selon une direction perpendiculaire au  
10 plan est nulle.

L'étape de pondération B6 permet ainsi d'une part de pondérer le  
vecteur à neuf variables afin de considérer comme nulles ou connues certaines  
des variables et de pondérer le vecteur de poids  $\alpha$  décrit précédemment afin de  
faciliter le calcul du critère à minimiser  $f$  en ignorant un ou plusieurs capteurs.

15 Par exemple, on choisit un vecteur de poids  $\alpha$  adapté à ignorer la  
mesure des capteurs sensibles à l'accélération :

$$\alpha = \begin{pmatrix} \underbrace{0 \ 0 \ 0}_{\text{accéléro}} \ \underbrace{1 \ 1 \ 1}_{\text{magnéto}} \end{pmatrix}$$

Dans le cas où il n'y a pas de perturbations magnétique  $b$  ou si celle-  
ci est connue, un capteur sensible au champ magnétique ayant trois axes de  
20 sensibilité permet de connaître l'orientation du solide selon deux dimensions.  
En outre, ces capteurs magnétométriques ne sont pas sensibles aux  
accélérations de telle sorte qu'il est possible de déterminer les orientations du  
solide indépendamment de son accélération.

De préférence, pour augmenter la sensibilité, on choisira le repère de  
25 référence avec un axe Z colinéaire au champ magnétique.

Le vecteur à neuf variables ainsi pondéré s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \underbrace{-\theta_2 \ \theta_3}_{\text{orientation}} \ \underbrace{\quad \quad \quad}_{\text{accélérations}} \ \underbrace{\tilde{b}_1 \ \tilde{b}_2 \ \tilde{b}_3}_{\text{perturbations}} \end{pmatrix}$$

Comme indiqué précédemment, les étapes d'évaluation du critère B4  
et de calcul B5 sont mises en œuvre en utilisant le vecteur de pondération  $\alpha$  et



le vecteur pondéré  $\Lambda$  de manière à estimer la valeur des angles  $\theta_2$  et  $\theta_3$  correspondant à l'orientation selon deux directions du solide.

Ensuite, une étape de réitération permet de réitérer les étapes de pondération B6 en modifiant le vecteur de poids  $\alpha$ .

- 5 Ainsi, à l'étape de pondération B6, on choisit un vecteur de poids  $\alpha$  adapté à ignorer la mesure des capteurs sensibles au champ magnétique :

$$\alpha = \begin{pmatrix} \underbrace{1 \ 1 \ 1}_{\text{accéléro}} \ \underbrace{0 \ 0 \ 0}_{\text{magnéto}} \end{pmatrix}$$

Parallèlement, le vecteur à neuf variables pondéré s'écrit de la manière suivante :

10 
$$\begin{pmatrix} \theta_1 \ \underbrace{\tilde{\theta}_2 = \hat{\theta}_2 \ \tilde{\theta}_3 = \hat{\theta}_3}_{\text{orientation}} \ \underbrace{a_1 \ a_2 \ \tilde{a}_3}_{\text{accélérations}} \ \underbrace{\text{---}}_{\text{perturbations}} \end{pmatrix}$$

dans lequel les angles d'orientation  $\theta_2$  et  $\theta_3$  sont estimés par les valeurs calculées précédemment, et la variable inconnue correspondant à l'accélération  $a_3$  est remplacé par une valeur connue déterminée en fonction de la configuration choisie.

- 15 Il est ainsi possible en réitérant les étapes d'évaluation du critère d'erreurs B4 et de calcul B5 de déterminer les valeurs des accélérations  $a_1$  et  $a_2$ .

- Ainsi, dans l'exemple précédent, les mesures données par les capteurs sensibles au champ magnétique permettent de déterminer deux états  
20 liés à l'orientation  $\theta_1$  et  $\theta_2$  du solide. Dans une seconde phase, les mesures données par les capteurs sensibles à l'accélération permettent d'estimer trois autres variables, et par exemple une variable liée à l'orientation  $\theta_3$  et deux variables liées à l'accélération du solide  $a_1$  et  $a_2$ .

- Bien entendu, en fonction de la configuration du mouvement du  
25 solide, si la valeur du troisième paramètre d'orientation  $\theta_3$  peut être estimée facilement ou donné par un autre système de mesure tel qu'un GPS, il est possible d'estimer les trois paramètres d'accélération  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  à partir de la mesure donnée par les capteurs sensibles à l'accélération.

Bien entendu, le procédé d'estimation du mouvement peut être mis en œuvre dans d'autres cas de configuration de mouvement, en particulier lorsque les perturbations magnétiques générées par le milieu sont inconnues.

Afin de résoudre le problème d'estimation, le vecteur à neuf variables  
5 doit être pondéré pour ne comporter qu'au plus cinq variables inconnues.

Dès lors que les trois variables liées aux perturbations magnétiques sont inconnues, il est nécessaire que le mouvement du solide comporte au moins quatre degrés de liberté connus.

Tel est le cas notamment lors d'un mouvement de la tête d'un  
10 promeneur selon les deux axes de rotation. Pour ce type de mouvement, la configuration des mouvements considère que les accélérations sont quasi nulles.

De même, lorsque le solide est mobile à plat dans un plan, il existe uniquement un angle de rotation, correspondant au cap du mouvement dans le  
15 plan, et deux accélérations inconnues de déplacement du mobile dans ce plan selon deux axes du plan.

Toute perturbation magnétique dans le plan peut également être déterminée par le procédé d'estimation du mouvement.

En pratique, le mode de résolution est le même que celui décrit  
20 précédemment, seul le formalisme entre les mesures réalisées par les capteurs sensibles au champ magnétique et le capteur sensible à l'accélération étant échangées.

Dans les exemples précédents, on a considéré qu'à l'étape de choix d'une configuration B7, il est possible de déterminer certains paramètres de  
25 perturbations magnétiques ou l'orientation du solide ou encore d'accélération de manière connue en fonction de la configuration du mouvement.

On peut également prévoir que le dispositif souhaite associer un certain mode de fonctionnement qui permette automatiquement d'établir une configuration de mouvements connue.

30 Ainsi, il est possible de paramétrer un mode de fonctionnement dit "voiture" qui correspond au déplacement dans un plan d'un solide, un mode dit "vélo", correspondant au déplacement dans un plan d'un solide ne provoquant

pas de perturbations magnétiques ou encore un mode "*mouvement de tête*" dont les accélérations sont quasi nulles.

En pratique, le choix de la configuration permettant de déterminer au moins quatre variables du vecteur à neuf variables inconnues à estimer peut  
5 être dynamique, et dépendre notamment de la surveillance du module du champ magnétique.

Ainsi, à l'étape de choix d'une configuration B7, une surveillance automatique du module du champ magnétique peut être mise en œuvre afin de tenir compte de manière progressive de la présence d'un perturbateur  
10 magnétique, telle que la présence d'un objet ferromagnétique générant des perturbations magnétiques sur les capteurs équipant le solide en mouvement.

Ainsi, la différence entre la norme du champ magnétique calculée à partir des mesures réelles et celle prédite est surveillée.

Dès que cette différence est trop importante, de l'ordre de 10%, le  
15 critère de confiance dans l'estimation est diminué proportionnellement.

De même, l'étape de choix d'une configuration B7 peut comporter une surveillance automatique du module du champ d'accélération mesuré.

Ainsi, quand la différence  $a - Go$  devient supérieure à 10%  $Go$ , alors l'accélération ne peut plus être négligée ou considérée comme constante.

20 Bien entendu, la présente invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation décrits précédemment.

En particulier, le dispositif de mesure peut comporter indifféremment des capteurs ayant trois axes de sensibilité ou trois capteurs ayant chacun un axe unique de sensibilité disposés en triaxe.

25 Par ailleurs, le vecteur de pondération  $\alpha$  peut comporter des coefficients de pondération compris entre les valeurs 0 et 1.

## REVENDEICATIONS

5                   1. Procédé d'estimation du mouvement d'un solide mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations définies par un vecteur à trois variables ( $b$ ), ledit mouvement étant défini par un vecteur à six variables ( $\theta$ ,  $a$ ) et ledit solide étant équipé d'au moins un capteur ( $Ca$ ) sensible à l'accélération ayant au moins trois axes de sensibilité et d'au moins un capteur ( $Cm$ ) sensible  
10 au champ magnétique ayant au moins trois axes de sensibilité, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'élaboration (B6) d'un vecteur à neuf variables ( $\Lambda$ ) constitué dudit vecteur de mouvement à six variables et dudit vecteur de perturbations à trois variables, et une étape de pondération (B6) dudit vecteur à neuf variables ( $\Lambda$ ) adaptée à transformer ledit vecteur à neuf variables en un  
15 vecteur à au plus cinq variables inconnues à estimer.

                  2. Procédé d'estimation conforme à la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de choix (B7) d'une configuration de mouvement parmi une table de configurations de mouvement, et en ce que l'étape de pondération (B6) est adaptée à remplacer une variable inconnue par une valeur  
20 connue dans ledit vecteur à neuf variables ( $\Lambda$ ) en fonction de ladite configuration choisie.

                  3. Procédé d'estimation conforme à la revendication 2, caractérisé en ce que ledit solide est mobile dans un milieu susceptible de générer des perturbations magnétiques, ladite configuration de mouvement étant choisie  
25 parmi un ensemble de configurations de mouvement comprenant notamment un mouvement dans un milieu sans perturbation magnétique, un mouvement dans un espace à une dimension, un mouvement dans un plan et un mouvement ayant au moins deux degrés de liberté connus.

                  4. Procédé d'estimation conforme à l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'étape de pondération (B6) comprend une étape de choix  
30 d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) adapté à modifier le poids respectif desdits capteurs équipant le solide et en ce que ledit procédé comprend une étape d'estimation

(B4, B5) d'au moins une variable dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure d'au moins un capteur.

5 Procédé d'estimation conforme à la revendication 4, caractérisé en ce qu'il comprend au moins une étape de réitération desdites étapes de choix (B6) d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) et d'estimation (B4, B5) d'au moins une variable du vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer, le vecteur de poids ( $\alpha$ ) choisi à ladite étape de choix étant différent à chaque étape de réitération.

6. Procédé d'estimation conforme à l'une des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de choix (B6) d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) adapté à ignorer la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération (Ca), une étape d'estimation (B4, B5) d'au moins deux variables ( $\theta_2, \theta_3$ ) dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique (Cm), une étape de choix (B6) d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) adapté à ignorer la mesure du ou des capteurs  
10 sensibles au champ magnétique (Cm) et une étape d'estimation (B4, B5) d'au plus les trois autres variables ( $\theta_1, a_1, a_2$ ) dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération (Ca).  
15

7. Procédé d'estimation conforme à l'une des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de choix (B6) d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) adapté à ignorer la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique (Cm), une étape d'estimation (B4, B5) d'au moins deux variables dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles à l'accélération (Ca), une étape de choix  
20 (B6) d'un vecteur de poids ( $\alpha$ ) adapté à ignorer les capteurs sensibles à l'accélération (Ca) et une étape d'estimation (B4, B5) d'au plus les trois autres variables dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer à partir de la mesure du ou des capteurs sensibles au champ magnétique (Cm).  
25

8. Procédé d'estimation conforme l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ledit vecteur ( $\Lambda$ ) à neuf variables comprend un vecteur de rotation  $\theta$  à trois degrés de liberté, ledit vecteur de rotation étant représenté par  
30

quatre composantes ( $q_0, q_1, q_2, q_3$ ) d'un quaternion ( $q$ ) associées à une contrainte sur lesdites quatre composantes ( $q_0, q_1, q_2, q_3$ ).

9. Procédé d'estimation conforme à la revendication 8, caractérisé en ce que, à l'étape d'estimation (B4, B5) d'au moins une variable dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer, ladite contrainte des composantes du quaternion ( $q$ ) est intégrée dans la représentation du vecteur de rotation  $\theta$ .

10. Procédé d'estimation conforme l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'à l'étape d'estimation (B5) d'au moins une variable dudit vecteur ( $\Lambda$ ) à au plus cinq variables inconnues à estimer, une fonction de minimisation d'erreurs de type quasi Newton est utilisée.

11. Dispositif d'estimation du mouvement d'un solide mobile dans un milieu adapté à générer des perturbations définies par un vecteur ( $b$ ) à trois variables, ledit mouvement étant défini par un vecteur ( $\theta, a$ ) à six variables, ledit dispositif étant monté sur ledit solide et comprenant au moins un capteur sensible à l'accélération ( $Ca$ ) ayant au moins trois axes de sensibilité ( $V1, V2, V3$ ) et au moins un capteur sensible au champ magnétique ( $Cm$ ) ayant au moins trois axes de sensibilité ( $V4, V5, V6$ ), caractérisé en ce qu'il est adapté à mettre en œuvre un procédé d'estimation du mouvement d'un solide conforme à l'une des revendications 1 à 10.

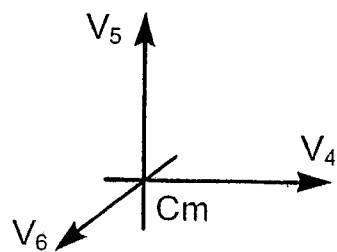
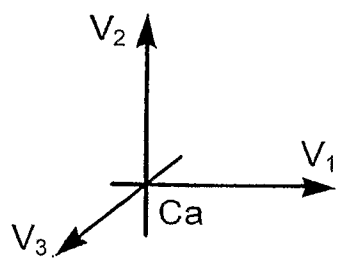
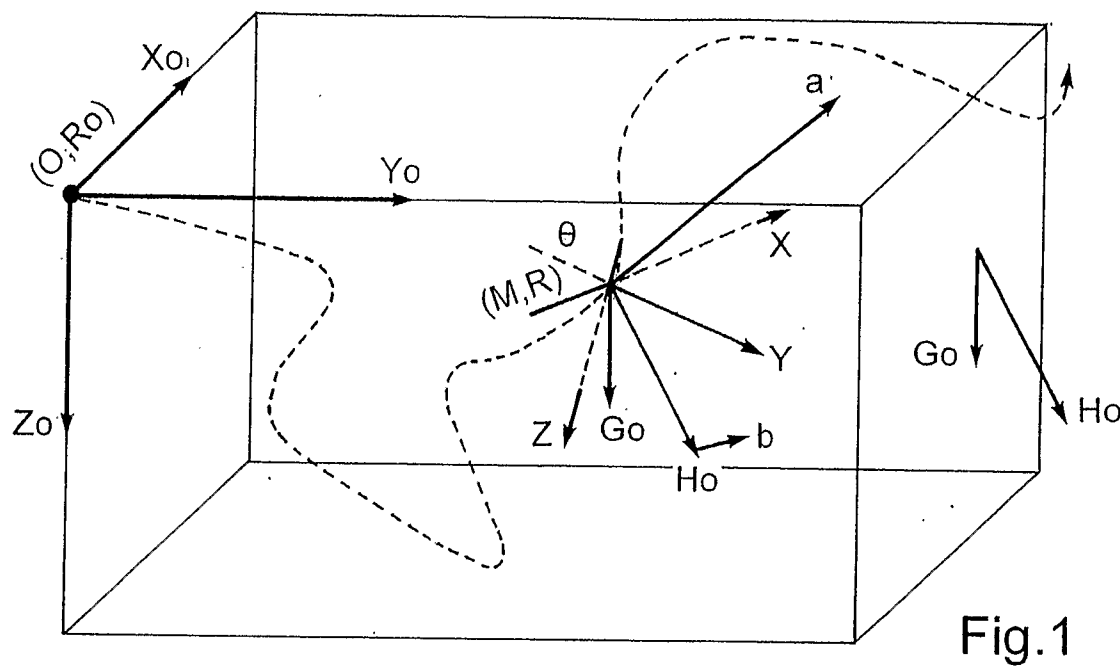


Fig.2A

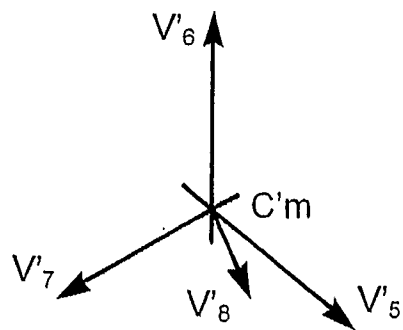
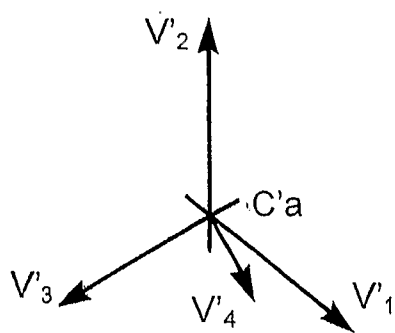


Fig.2B

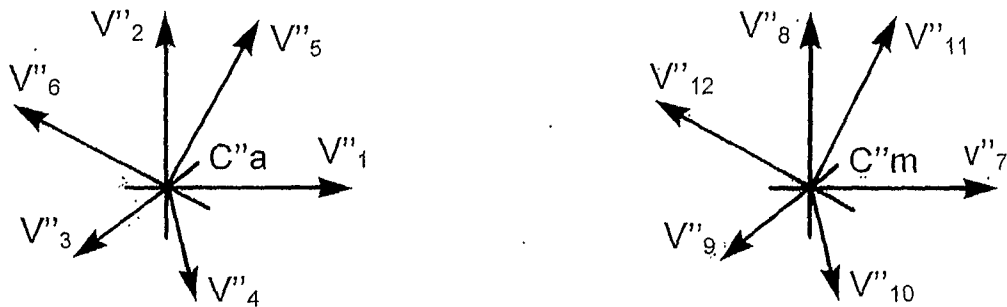


Fig.2C

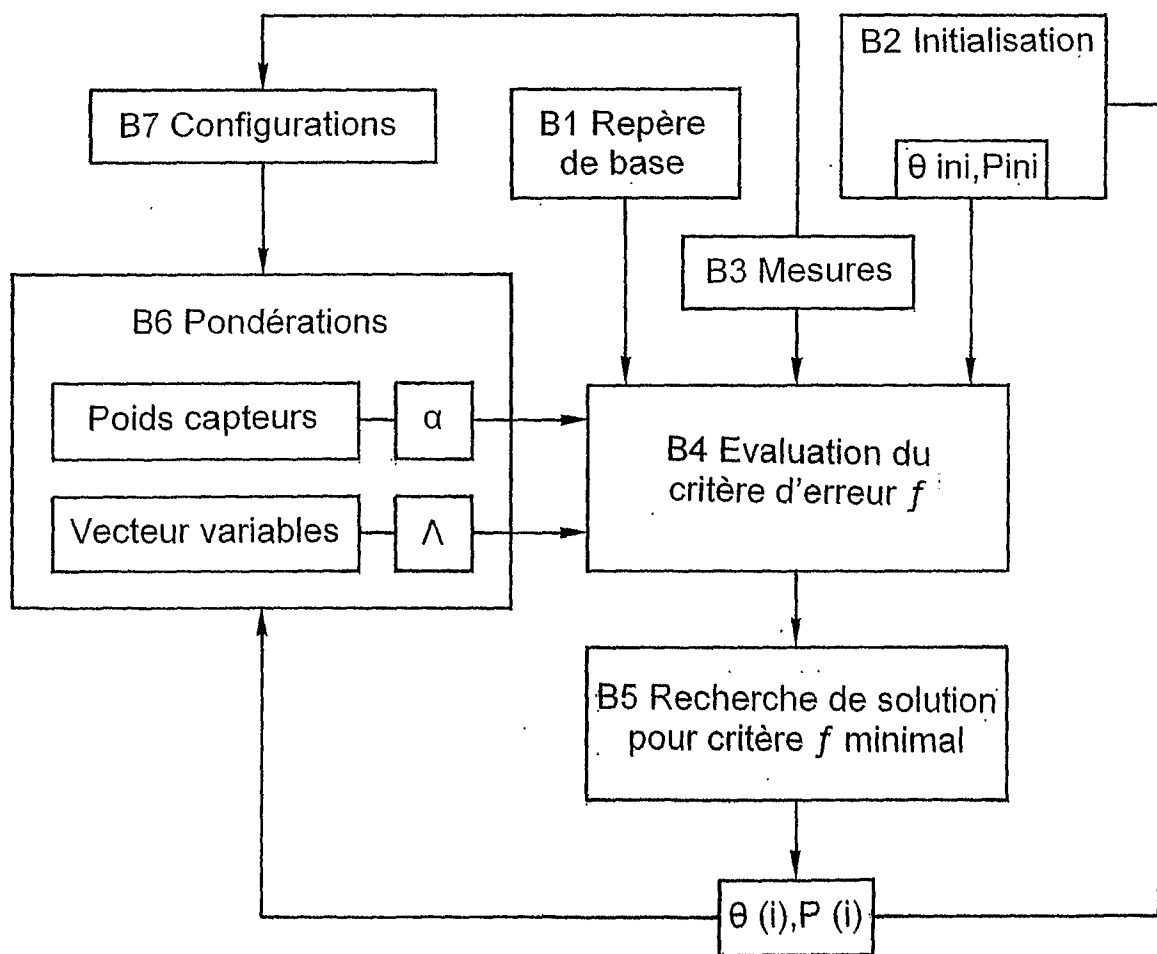


Fig.3