

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/005532 A1

(43) Date de la publication internationale
14 janvier 2016 (14.01.2016)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :
G01S 19/49 (2010.01)

(74) Mandataire : REGIMBEAU; Regimbeau, 20, rue de Chazelles, F-75847 Paris Cedex 17 (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/065769

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

(22) Date de dépôt international :
9 juillet 2015 (09.07.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1401535 9 juillet 2014 (09.07.2014) FR

(71) Déposants : SAGEM DEFENSE SECURITE [FR/FR]; 18/20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne-billancourt (FR). ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE DEVELOPPEMENT DES METHODES ET PROCES-SUS INDUSTRIELS - A.R.M.I.N.E.S. [FR/FR]; 60, boulevard Saint-Michel, F-75006 Paris (FR).

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

(72) Inventeurs : BARRAU, Axel; c/o Sagem Défense Sécurité 18/20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne-billancourt (FR). BONNABEL, Silvère; c/o Mines ParisTech 60, boulevard Saint-Michel, F-75272 Paris Cedex 06 (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : INVARIANT PARTICLE FILTER

(54) Titre : FILTRE PARTICULAIRE INVARIANT

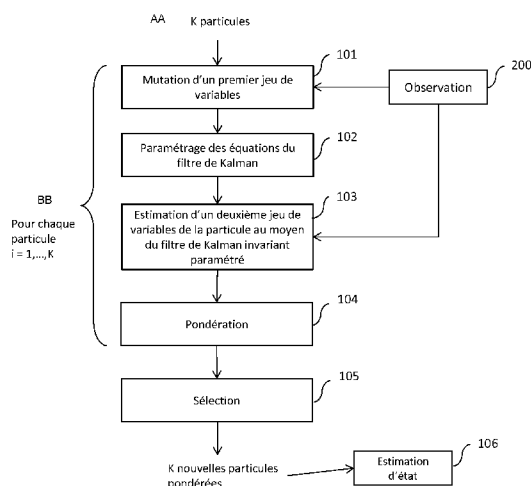


FIG. 2

AA...K particles
BB...For each particle $i = 1, \dots, K$
101...Mutation of a first set of variables
102...Parameterization of the equations of the Kalman filter
103...Estimation of a second set of variables of the particle by means of the parameterized invariant Kalman filter
104...Weighting
105...Selection
200...Observation
CC...K new weighted particles
106...State estimation

(57) Abstract : A method is provided for estimating the state of a moving system, the method using a particle filter and comprising the following steps implemented on one reference particle among a plurality of previously calculated particles, the reference particle providing an estimation of the state and comprising a first set of variables and a second set of variables: random mutation (101), by the particle filter, of the first set of variables into a mutated first set of variables; parameterization (102) of an extended Kalman filter using the mutated first set of variables; and implementation (103) of the parameterized extended Kalman filter to produce a new particle by way of the second set of variables and data measured by at least one sensor, the method being characterized in that the extended Kalman filter is an invariant extended Kalman filter, and in that the second set of variables comprises at least the variables: orientation, speed and position of the moving system, the invariant extended Kalman filter being configured assuming that: the pair of variables orientation and position has a property of invariance on application of a rotation or translation to said pair, and that the pair of variables orientation and speed has a property of invariance on application of a rotation or translation to said pair.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2016/005532 A1

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

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

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

Publiée :

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

Il est proposé un procédé d'estimation de l'état d'un système mobile, le procédé mettant en œuvre un filtre particulaire et comprenant les étapes suivantes mises en œuvre à partir d'une particule de référence parmi plusieurs particules précédemment calculées, la particule de référence offrant une estimation de l'état et comprenant un premier jeu de variables et un deuxième jeu de variables: mutation aléatoire (101), par le filtre particulaire, du premier jeu de variable en un premier jeu de variable muté, paramétrage (102) d'un filtre de Kalman étendu à l'aide du premier jeu de variable muté, mise en œuvre (103) du filtre de Kalman étendu paramétré pour produire une nouvelle particule à partir du deuxième jeu de variable et de données mesurées par au moins un capteur, le procédé étant caractérisé en ce que le filtre de Kalman étendu est du type invariant, et en ce que le deuxième jeu de variables comprend au moins des variables d'orientation, de vitesse et de position du système mobile, le filtre de Kalman étendu invariant étant configuré sous l'hypothèse que: le couple des variables d'orientation et de position présente une propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple, et que -le couple des variables d'orientation et de vitesse présente une propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple.

Filtre particulaire invariant

DOMAINE GENERAL

L'invention se rapporte au domaine des procédés estimant l'état
5 d'un système dynamique à partir de mesures incomplètes ou bruitées.

L'invention concerne plus particulièrement un procédé mettant en
œuvre un filtre particulaire de type particulier.

ETAT DE L'ART

10 Le filtre de Kalman est un outil bien connu pour estimer l'état d'un
système dynamique régi par des équations matricielles, donc linéaires, au
moyen de mesures bruitées.

Pour étendre le filtre de Kalman à des systèmes dynamiques régis
par des équations non-linéaires, il a été proposé un procédé désigné sous
15 l'expression de « filtre de Kalman étendu » (EKF). Cette évolution propose
une étape supplémentaire consistant à linéariser à chaque nouvelle
itération du filtre les équations régissant le système non-linéaire en un
point de l'espace vectoriel qui est un état estimé au cours d'une itération
précédente. Les matrices issues de cette linéarisation peuvent être ainsi
20 utilisées pour calculer un nouvel état estimé selon la méthode du filtre de
Kalman classique.

Toutefois, le filtre de Kalman étendu s'avère peu efficace lorsque
le bruit des mesures est non gaussien. Dans le cadre particulier de
mesures effectuées par un récepteur GNSS, on constate que ces mesures
25 présentent un biais sujet à des « sauts » brusques imprévisibles et
susceptibles de faire diverger irrémédiablement l'estimation de l'état.

On connaît par ailleurs un type particulier de filtre de Kalman
étendu, dit « filtre de Kalman étendu invariant », décrit notamment dans
l'article :

30 « Invariant Extended Kalman Filter : theory and application to a
velocity-aided attitude estimation problem », Silvère Bonnabel et al. -

Decision and control, 2009 - Proceedings of the 48th IEEE conference - 15 décembre 2009 - pages 1297-1304.

Le filtre invariant décrit dans cet article est configuré de façon à tirer parti de certaines propriétés d'invariance remplies par des variables
5 d'orientation et de vitesse.

Cette configuration de filtre consiste à linéariser une variable d'erreur présentant les mêmes invariances que ces variables d'orientation et de vitesse, au lieu de linéariser la variables d'erreur que l'on peut rencontrer dans un filtre de Kalman étendu classique.

10 En d'autres termes, la différence entre un filtre de Kalman étendu et un filtre de Kalman étendu invariant consiste en un choix particulier pour la variable d'erreur.

Cependant, le filtre décrit dans cet article fonctionne sur la base de mesures de vitesses acquises par un capteur de vitesse. Un tel filtre
15 n'est pas adapté à des systèmes travaillant sur la base de mesures de position (certains systèmes de radionavigation par satellite par exemple).

Par ailleurs, dans ce document il est fait l'hypothèse d'invariance selon laquelle l'équation décrivant l'évolution du système est inchangée par l'action d'un certain groupe de transformations agissant sur le système
20 et ses entrées (c.f. « Définition 2 », page 1298, colonne de gauche).

Le filtrage particulière, également connu sous le nom de méthode de Monte-Carlo séquentielle, est un autre procédé pour estimer un système dynamique non-linéaire, lequel supporte des mesures bruitées selon un bruit non gaussien.

25 Le principe général d'un filtre particulière consiste à explorer l'espace de l'état considéré à estimer à l'aide d'une pluralité d'échantillons conventionnellement appelés « particules », chaque particule offrant une estimation plus ou moins vraisemblable de l'état.

Selon une variante de base bien dite « bootstrap », les étapes
30 suivantes sont mises en œuvre par le filtre particulière :

- une « mutation », au cours de laquelle chaque particule est propagée aléatoirement dans l'espace d'état,
- une « pondération », au cours de laquelle on calcule pour chaque particule propagée un poids associé à partir d'un nouveau jeu de mesures, le poids indiquant le degré de vraisemblance de la particule par rapport à l'état réel du système compte tenu de ces mesures,
- une « sélection », au cours de laquelle des particules assorties d'un poids faible sont éliminées tandis que les particules assorties d'un poids élevé, plus vraisemblables, sont conservées.

D'itération en itération, les particules explorent l'espace d'état de façon indépendante les unes les autres.

Le filtre particulaire est donc d'autant plus coûteux en ressources de calcul qu'il existe un nombre élevé de particules à maintenir.

De plus, la variante « bootstrap » est sujette à un problème de dégénérescence des poids : une seule particule finit par présenter un poids très élevé, tandis que les autres particules présentent un poids proche de zéro, ce qui rend l'estimation peu efficace en plus d'être coûteuse.

Une variante améliorée de filtre particulaire a ainsi été proposée pour pallier cet inconvénient : le filtre particulaire de Rao-Blackwell (« Rao-Blackwellized particle filter », ou RBPF en anglais), notamment décrit dans le document :

- CAPPE O et al. - "An Overview of Existing Methods and Recent Advances in Sequential Monte Carlo"- Proceedings of the IEEE, vol. 95, n° 5 - 1er Mai 2005 - pages 899-924

Le filtre RBF propose de décomposer un état de dimension K en un premier jeu de variables et un deuxième jeu de variables, ces deux jeux subissant des traitements différents au cours d'une itération donnée.

L'étape de mutation du filtrage particulaire est alors mise en œuvre de façon sélective sur le premier jeu de variable, ce qui permet de réduire le nombre de particules à maintenir au fil des itérations par rapport à la variante « bootstrap » de base.

- 5 Par ailleurs, le deuxième jeu de variables est considéré comme un état de dimension inférieur à K que l'on estime au moyen d'un filtre de Kalman étendu.

Or, les calculs mis en œuvre par le filtre de Kalman étendu comprennent des inversions de matrices particulièrement coûteuses en charge de calcul. Cette charge de calcul est de plus multipliée par le
10 nombre de particules à traiter par le filtre de Rao-Blackwell.

PRESENTATION DE L'INVENTION

L'invention vise à proposer un estimateur de l'état d'un système
15 dynamique non linéaire et sujet à des bruits de mesures non-gaussiens dont la charge de calcul est réduite par rapport à un filtre particulaire de Rao-Blackwell conventionnel.

Dans ce but, il est proposé selon un premier aspect un procédé d'estimation d'un état représentatif du mouvement d'un système mobile,
20 le procédé mettant en œuvre un filtre particulaire et comprenant les étapes suivantes mises en œuvre à partir d'une particule de référence parmi plusieurs particules précédemment calculées, la particule de référence offrant une estimation de l'état et comprenant un premier jeu de variables et un deuxième jeu de variables:

- 25 – mutation aléatoire, par le filtre particulaire, du premier jeu de variable en un premier jeu de variable muté,
– paramétrage d'un filtre de Kalman étendu à l'aide du premier jeu de variable muté,
– mise en œuvre du filtre de Kalman étendu paramétré pour produire
30 une nouvelle particule à partir du deuxième jeu de variable et de données mesurées par au moins un capteur,

le procédé étant caractérisé en ce que le filtre de Kalman étendu est du type invariant, et en ce que le deuxième jeu de variables comprend au moins des variables d'orientation, de vitesse et de position du système mobile, le filtre de Kalman étendu invariant étant configuré sous
5 l'hypothèse que :

- le couple des variables d'orientation et de position présente une propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple, et que
- le couple des variables d'orientation et de vitesse présente une
10 propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple.

Une propriété intéressante du filtre de Kalman étendu invariant est que les particules peuvent avoir toutes une même covariance.

En conséquence, l'utilisation d'un filtre de Kalman invariant dans le
15 contexte particulier d'un filtrage particulière faisant évoluer k particules permet de s'affranchir du calcul de k covariances, et donc de réduire considérablement la charge de calcul nécessaire à l'estimation de l'état, par rapport à un filtre particulière de Rao-Blackwell classique.

On peut noter que le filtre de Kalman étendu invariant décrit dans
20 le document « Invariant Extended Kalman Filter: theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem » discuté en introduction ne fait pas intervenir la position du système mobile considéré mais seulement son orientation et sa vitesse ; de plus, l'hypothèse d'invariance décrite dans cet article n'est pas généralisable à un système incluant en plus une
25 variable de position.

Le procédé selon la présente invention propose ainsi de configurer un filtre de Kalman étendu invariant sous deux hypothèses d'invariances, l'une remplie par un couple de variables d'orientation et de vitesse, et l'autre remplie par un couple des variables d'orientation et de position.

L'invention peut également être complétée par les caractéristiques suivantes, prises seules ou en une quelconque de leurs combinaisons techniquement possibles.

Le deuxième jeu de variables peut comprendre une covariance
5 représentative d'une incertitude au sens de Kalman des autres variables du deuxième jeu.

Les étapes du procédé selon le premier aspect peuvent être répétées pour chacune des particules, le filtre de Kalman utiliser une équation de Ricatti commune pour toutes les particules.

10 L'étape de mutation tient compte de mesures de l'état pour produire le premier jeu de variables muté.

Les étapes du procédé selon le premier aspect étant répétées pour chacune des particules, l'étape de mutation peut comprendre une décomposition de Cholesky commune pour toutes les particules.

15 Le filtre de Kalman étendu invariant peut être mis en œuvre pour une pluralité de particules, ladite mise en œuvre comprendre une propagation du deuxième jeu de variables par intégration d'une équation dynamique, l'intégration comprenant, pour une particule de référence :

- la détermination d'une solution générale présentant une forme à
20 au moins une inconnue,
- le choix de conditions initiales pour déterminer une solution complète propre à la particule de référence,

la détermination de la solution générale étant mise en œuvre une seule fois pour toutes les particules.

25 Le procédé d'estimation selon le premier aspect trouve avantageusement application dans le domaine de la navigation satellite.

Le premier jeu peut alors contenir des variables représentatives d'un biais dans des mesures de radionavigation satellite.

Il est proposé, selon un deuxième aspect, une unité de traitement
30 de données mesurées adaptée pour mettre en œuvre le procédé selon le premier aspect.

Il est en outre proposé selon un troisième aspect, un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes du procédé selon le premier aspect, lorsque ce programme est exécuté par cette unité de traitement
5 de données.

Il est également proposé, selon un quatrième aspect, un procédé d'estimation de l'état d'un système mobile mis en œuvre par une centrale de navigation comprenant au moins un récepteur de signaux de
10 radionavigation satellite, au moins un capteur inertiel, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- acquisition de mesures par les capteurs,
- mise en œuvre des étapes du procédé selon le premier aspect pour produire un ensemble de particules à partir des données mesurées,
- 15 – estimation de l'état du système mobile à partir de l'ensemble de particules.

Selon un quatrième aspect, il est en outre proposé une centrale de navigation comprenant :

- au moins un récepteur de signaux de radionavigation satellite,
- 20 – au moins un capteur inertiel,
- une unité de traitement de données de mesure pour estimer un état de navigation de la centrale à partir de mesures acquises par le récepteur et par le capteur inertiel.

25 DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

- La figure 1 représente schématiquement une centrale inertielle
30 selon un mode de réalisation de l'invention.

- La figure 2 représente les étapes d'un procédé de filtrage particulière selon un mode de réalisation de l'invention.
 - La figure 3 détaille une étape particulière de la figure 2 mise en œuvre par un filtre de Kalman invariant.
- 5 Sur l'ensemble des figures, les éléments similaires portent des références identiques.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

La description qui suit comprend trois parties :

- 10
- une première partie (I) décrivant le principe général d'un filtre particulière invariant selon un mode de réalisation de l'invention,
 - une deuxième partie (II) décrivant un mode de réalisation particulier appliqué à l'estimation de l'état d'une central de navigation,
- 15
- une troisième partie (III) détaillant des astuces d'implémentation particulières et optionnelles du mode de réalisation selon la deuxième partie.

1. Principe général de fonctionnement d'un filtre particulière invariant

20

En référence à la **figure 1**, on considère dans un premier temps une unité de traitement U de données de mesures.

L'unité de traitement U est par exemple un processeur ou un ensemble de processeur(s) adapté(s) pour exécuter un programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme.

25

L'unité U est configurée pour mettre en œuvre un estimateur qualifié dans la suite de « filtre particulière invariant », cet estimateur ayant pour objectif d'estimer le mouvement d'un système mobile.

Le filtre particulière invariant sollicite un filtre particulière de Rao-Blackwell combiné à un filtre de Kalman d'un type particulier : un filtre de Kalman étendu invariant.

30

A ce stade, on suppose également que l'unité de traitement U comprend une entrée recevant des données mesurées par un ou plusieurs capteurs adaptés pour mesurer des grandeurs physiques liées au système mobile (vitesse, position, accélération, etc.).

- 5 Ces mesures sont également dénommées « observations » dans la suite.

On considère tout d'abord un jeu de variables régies par un système linéaire susceptible d'être traité par un filtre de Kalman défini par des équations matricielles. Ces équations matricielles, connues à l'avance
10 dans le cas d'un filtre de Kalman classique, dépendent ici d'un ou plusieurs paramètres supplémentaires inconnus évoluant aléatoirement au cours du temps.

On utilise donc un filtre particulière pour produire différents échantillons (ou particules) de ces paramètres supplémentaires. Chaque
15 particule fournit un jeu d'équations linéaires spécifique utilisé par le filtre de Kalman pour élaborer une nouvelle estimation du jeu de variable précédemment mentionné.

Le filtre de Kalman fournit également une valeur de vraisemblance de chaque paramètre testé. On sélectionne alors les paramètres
20 supplémentaires d'après leur vraisemblance.

Le filtre de Kalman utilisé est du type étendu invariant.

L'utilisation de ce filtre étendu invariant rend possible le traitement d'un jeu de variables régies par un système cette fois non-linéaire, le jeu de variables présentant une propriété d'invariance. Cette
25 propriété d'invariance est notamment exposée dans l'article « Invariant Extended Kalman Filter: theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem », par S. Bonnabel, P. Martin et E. Salaun, publié dans In Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference, CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE
30 Conference on (pp. 1297-1304). IEEE. On notera ici que l'ajout d'une variable de position empêche d'obtenir l'hypothèse d'invariance exposée

dans ces articles. Mais le filtre invariant configuré comme si elle était vérifiée présente cependant des propriétés avantageuses dont l'invention tire parti.

L'unité U de traitement met en œuvre le filtre particulière
5 invariant dans des itérations successives, ou cycles, pour estimer des états successifs du système mobile, l'évolution desdits états étant représentative du mouvement du système mobile.

On considère dans la suite que le terme « état » peut désigner un ensemble de variables représentatives de grandeurs physiques liées au
10 système mobile (vitesse, position, accélération, etc. de ce système mobile).

Chaque itération prenant en entrée des données calculées par l'unité U dans une itération précédente, ainsi que des mesures externes fournies par des capteurs, chaque itération produisant des nouvelles
15 estimations de l'état désignées sous le terme conventionnel de particules comme on l'a vu en introduction.

L'état est construit à partir du jeu de variables - attitude/position/vitesse et des paramètres supplémentaires susmentionnés. L'état peut être représenté par un vecteur comprenant un
20 premier jeu de variables (les paramètres supplémentaires) et un deuxième jeu de variables (attitude/position/vitesse au moins).

On va maintenant décrire une itération courante du filtre particulière mis en œuvre par l'unité U de traitement de données selon un mode de réalisation illustré en **figure 2**.

25 On suppose que k particules pondérées ont été calculées au cours d'une itération précédente du filtre particulière invariant. Par définition, chaque particule est un vecteur comprenant :

- un vecteur contenant au moins attitude, position et vitesse,
- un vecteur contenant les paramètres supplémentaires,
- 30 – la covariance des variables du deuxième jeu de variables.

Chaque particule fait l'objet de plusieurs traitements au cours de l'itération courante. On considère, parmi les k particules, une particule donnée, dite particule de référence, pour laquelle on décrit ces traitements.

5

a) Mutation

Dans une étape dite de « mutation » (étape 101), les paramètres supplémentaires de la particule de référence sont propagés aléatoirement dans leur espace, à la manière d'un filtre particulaire classique. Le
10 résultat obtenu est un jeu de paramètres supplémentaire modifié, dit dans la suite « muté ».

Selon une variante particulière, lorsqu'une observation est disponible (étape d'observation 200), l'étape de mutation 101 peut tenir compte de cette observation en plus du modèle de propagation aléatoire
15 utilisé. Cette correction permet ainsi de rapprocher les particules des paramètres supplémentaires vrais.

On notera que cette correction est avantageuse dans le cas où l'observation est sujette à des sauts brusques (phénomène rencontré dans le cas où l'observation est issue d'un récepteur GNSS/GPS, comme on le
20 verra dans une application particulière du procédé selon l'invention dans la partie II).

On pourra par exemple utiliser pour mettre en œuvre cette correction la technique dénommée « optimal sampling ». D'autres heuristiques sont néanmoins utilisables.

25

b) Propagation / Mise à jour

Les équations du filtre de Kalman invariant comprennent une équation dynamique, représentant le comportement *a priori* du système, et une équation d'observation, représentant le comportement des
30 capteurs utilisés pour faire obtenir des observations, également appelées mesures.

Les équations du filtre de Kalman sont paramétrées en fonction des valeurs du jeu de paramètres supplémentaires mutés obtenues à l'issue de l'étape de mutation 101.

Dans le cas particulier où l'équation dynamique ne dépend pas des paramètres supplémentaires, on peut faire l'économie de l'étape de mutation lorsqu'il n'y a pas d'observation disponible.

Le deuxième jeu de variables de la particule de référence est ensuite estimé au moyen du filtre de Kalman étendu invariant.

En référence à la **figure 3**, le vecteur du deuxième jeu de variables est propagé à la manière d'un filtre de Kalman invariant, en utilisant l'équation dynamique (étape dite de propagation 301).

La covariance des variables constituant le deuxième jeu de variables (contenant au moins attitude, position et vitesse) fait également l'objet d'une propagation au moyen de l'équation de Riccati associée au filtre de Kalman invariant (étape 303), construite en utilisant l'équation dynamique.

Si une nouvelle observation est rendue disponible par les capteurs utilisés (étape d'observation 200), le vecteur du deuxième jeu de variables est mis à jour à la manière d'un filtre de Kalman invariant, en utilisant l'équation d'observation de ce filtre paramétré à l'aide des paramètres supplémentaires. De même, la covariance obtenue à l'issue de des étapes de propagation 303 est mise à jour à l'aide du filtre de Kalman invariant.

La mise à jour 302 par le filtre de Kalman étendu invariant fournit également une vraisemblance pour la nouvelle particule.

De retour à la **figure 2**, dans une étape de pondération 104, le poids de la particule est multiplié par l'exponentielle de la vraisemblance.

On obtient en sortie du filtre de Kalman invariant une nouvelle particule pondérée, élaborée à partir de la particule de référence.

On notera que l'étape de pondération, qui est ordinairement mise en œuvre dans un filtre particulière de type « bootstrap », est ici mise en

œuvre à partir des données produites par le filtre de Kalman étendu invariant.

Les étapes ci-dessus sont répétées au cours de l'itération courante pour les autres $k-1$ particules, produisant ainsi $k-1$ autres nouvelles
5 particules assorties chacune d'un poids correspondant.

Les poids peuvent être normalisés de façon à ce que leur somme vaille 1.

L'itération courante produit donc k nouvelles particules pondérées.

10 c) Sélection

L'itération courante peut également comprendre une étape de sélection 105, au cours de laquelle des particules assorties d'un poids faible sont éliminées tandis que des particules assorties d'un poids élevé, plus vraisemblables, sont dupliquées. Cette sélection peut être
15 déclenchée sur un critère de dispersion des poids, afin de minimiser le problème de dégénérescence des poids mentionnés.

La sélection 105 produit k nouvelles particules pondérées qui sont ensuite utilisées comme données d'entrée d'une itération suivante du filtre particulaire invariant.

20 Une propriété intéressante du filtre de Kalman invariant est que la covariance est souvent commune pour les k particules. En conséquence, l'utilisation d'un filtre de Kalman invariant permet de s'affranchir du calcul de k covariances, et donc de réduire considérablement la charge de calcul nécessaire à la mise en œuvre les étapes de propagation et de mise
25 à jour, qui comprennent des inversions de matrices particulièrement coûteuses. L'étape 102 n'est donc mise en œuvre qu'une seule fois dans l'itération courante en ce qui concerne la propagation de la covariance commune.

En conséquence, le procédé proposé est donc particulièrement
30 avantageux lorsque l'unité U de traitement est limitée en charge de calcul

(c'est typiquement le cas pour des équipements embarqués sur des aéronefs).

d) Estimation

- 5 Au terme d'une itération, une estimation de l'état (ou d'une fonction de l'état) peut être calculée en effectuant une moyenne pondérée des k nouvelles particules. Il n'est pas nécessaire de procéder à une telle estimation à la fin de chaque itération, mais seulement à l'issue de certaines d'entre elles.
- 10 L'estimation de l'état obtenue est la donnée de sortie de l'estimateur.

II. Application du filtre particulaire invariant à une centrale de navigation

- 15 De retour à la **figure 1**, une centrale de navigation IN comprend au moins un récepteur R de signaux de radionavigation satellite, au moins un capteur inertiel CI, et une unité U de de traitement de données adaptée pour mettre en œuvre le filtre particulaire invariant défini en partie I.
- 20 Dans cette application, l'unité de traitement U est plus particulièrement configurée pour mettre en œuvre une estimation d'un état de navigation de la centrale, à partir de mesures acquises par le récepteur et le capteur inertiel, et au moyen du filtre particulaire invariant ci-dessus décrit.
- 25 Les capteurs inertiels comprennent dans un mode de réalisation des trois gyromètres (un par axe) et trois accéléromètres (un par axe).
- Le récepteur R est du type GNSS/GPS.

Variables

- 30 Les variables suivantes sont utilisées :
- Instant t considéré

- orientation du porteur T_t (matrice de rotation)
- vitesse du porteur v_t (vecteur de dimension 3)
- position du porteur x_t (vecteur dimension 3)
- biais GPS b_t (vecteur de dimension 3).

5

Entrées du système

Les entrées du système sont les suivantes :

- vitesse angulaire ω_t (vecteur de dimension 3, données par le gyromètre)
- 10 – force spécifique f_t (vecteur de dimension 3, donné par les accéléromètres)

Observations

- Les observations (au sens d'un filtre de Kalman sont : une mesure
- 15 de position Y_n fournie aux instants t_n par le récepteur R (vecteur de dimension 3)

Equations mises en œuvre

Les équations suivies par ces variables sont :

$$\frac{d}{dt}T_t = T_t(\omega_t + w_\omega)_\times$$

$$\frac{d}{dt}v_t = g + T_t(f_t + w_f)$$

$$\frac{d}{dt}x_t = v_t$$

$$Y_n = x_{t_n} + b_{t_n} + V_n$$

20

Où w_ω est le bruit (de variance Q_ω) associé à la mesure du gyroscope, w_f est le bruit (de variance Q_f) associé à la mesure de l'accéléromètre, V_n est la part non biaisée du bruit associé à la mesure du récepteur GPS et g

le vecteur de gravité à l'endroit donné par le GPS. La variance de V_n est notée r^2 .

b_t est constant, sauf à des instants aléatoires où il subit un saut et prend une valeur aléatoire gaussienne, de moyenne 0 et de variance σ_b^2 . La
5 durée entre deux sauts est indépendante des autres variables et suit une loi exponentielle de paramètre λ . Les notations suivantes seront de plus

utilisées: $H = \begin{pmatrix} 0_3 \\ 0_3 \\ I_3 \end{pmatrix}^T$, $\mathfrak{N}(y, \Sigma, x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{\dim(\Sigma)}{2}} |\Sigma|^{1/2}} \exp(-\frac{1}{2}(y-x)^T \Sigma^{-1}(y-x))$

(densité gaussienne de moyenne x et de covariance Σ). Pour tout vecteur $u \in \mathbb{R}^3$ on notera $(u)_\times$ la matrice 3×3 antisymétrique telle que pour tout
10 autre vecteur $x \in \mathbb{R}^3$ on ait $(u)_\times x = u \times x$, le symbole $\times$ désignant le produit vectoriel.

Le jeu de variables traitées par filtrage invariant (deuxième jeu de variables) est formé par T_t, v_t, x_t .

En effet, si le biais est connu on peut reformuler le problème en
15 introduisant les variables suivantes :

$$\chi = \begin{pmatrix} T_t & v_t & x_t \\ 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad w = \begin{pmatrix} (w_\omega)_\times & w_f & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le système se réécrit alors sous la forme :

$$\frac{d}{dt} \chi_t = g_{\omega, f}(\chi_t) + \chi_t w$$

$$Y_n = \chi_t \begin{pmatrix} V \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Où $g_{\omega, f} : \begin{pmatrix} T_t & v_t & x_t \\ 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} T_t(\omega_t)_\times & T_t f_t + g_t & v_t \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 0 \end{pmatrix}$ est une fonction

dépendant des incréments ω_t et f_t . Elle prend en argument une matrice 5×5 , rend une matrice 5×5 et vérifie :

$$20 \quad g_{\omega, f}(\chi_1 \chi_2) = \chi_1 g_{\omega, f}(\chi_2) + g_{\omega, f}(\chi_1) \chi_2 - \chi_1 I_5 \chi_2.$$

- Les paramètres supplémentaires sont : le biais b_t .
- On considère donc ici des particules comprenant $(\hat{T}_t, \hat{v}_t, \hat{x}_t, \hat{b}_t)$.

On va maintenant détailler à nouveau les étapes de la **figure 2** appliquées à la centrale inertielle.

Dans une étape préliminaire d'initialisation, le deuxième jeu de variables (attitude/position/vitesse) est initialisé selon une densité *a priori*, les poids des k particule sont initialisées à 1/k, les valeurs des biais sont tirées aléatoirement selon une densité *a priori*, la covariance commune à toutes les particules est initialisée à une valeur estimée *a priori*.

10

a) Mutation

Dans l'étape de mutation 101, le biais b est propagé aléatoirement dans son espace, à la manière d'un filtre particulaire classique.

Dans le présent système, l'équation dynamique ne dépend pas du biais b_t : on peut faire l'économie de l'étape de mutation lorsqu'il n'y a pas d'observation disponible.

Si une observation est disponible à un instant t_n , c'est-à-dire lorsque le récepteur R produit une nouvelle mesure GPS assortie d'un biais correspondant, l'étape de mutation est mise en œuvre par les équations suivantes.

20

On calcule Π_1 et Π_2 d'après les définitions suivantes :

$$\Pi_1 = (1 - e^{-\lambda\Delta t}) \mathfrak{N}(Y_n, \hat{T}_{t_n} H P H^T \hat{T}_{t_n}^T + \sigma_b^2 I_3 + r^2 I_3, \hat{x}_{t_n})$$

$$\Pi_2 = e^{-\lambda\Delta t} \mathfrak{N}(Y_n, \hat{T}_{t_n} H P H^T \hat{T}_{t_n}^T + r^2 I_3, \hat{x}_{t_n} + \hat{b}_{t_n})$$

Où $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ est l'intervalle séparant l'arrivée des deux dernières observations.

s est la réalisation d'une variable aléatoire réelle suivant une loi uniforme sur $[0,1]$.

25

Si $s < \frac{\Pi_2}{\Pi_1 + \Pi_2}$ le biais $\hat{b}_{t_n}$ ne change pas. Sinon il est mis à jour comme suit :

$$\hat{b}_{t_n} \leftarrow \hat{b}_{t_n} + N_1$$

Où N_1 suit une loi gaussienne de moyenne $\hat{T}_{t_n} K_b \hat{T}_{t_n}^T (Y_n - \hat{x}_{t_n})$ et de variance $\hat{T}_{t_n} P_b \hat{T}_{t_n}^T$, avec $K_b = \sigma_b^2 (H P H^T + \sigma_b^2 I_3 + r^2 I_3)^{-1}$ et $P_b = \sigma_b^2 (I_3 - K_b)$.

En d'autres termes le biais est mis à jour selon l'équation :

$$\hat{b}_{t_n} \leftarrow \hat{b}_{t_n} + \hat{T}_{t_n} K_b \hat{T}_{t_n}^T (Y_n - \hat{x}_{t_n}) + L \times n_1$$

5 Où L vérifie la relation : $L \times L^T = \hat{T}_{t_n} P_b \hat{T}_{t_n}^T$

On notera que dans le système dynamique selon la présente application particulière, l'équation dynamique ne dépend pas du biais, et l'équation d'observation dépend bien du biais b .

10 b) Propagation / Mise à jour

Le vecteur du deuxième jeu de variables et sa covariance sont ensuite propagées (étapes de propagation 301, 303) au moyen d'un filtre de Kalman invariant, en utilisant l'équation dynamique suivante.

$$\frac{d}{dt} \hat{T}_t = \hat{T}_t (\omega_t)_\times$$

$$\frac{d}{dt} \hat{v}_t = g + \hat{T}_t f_t$$

$$\frac{d}{dt} \hat{x}_t = \hat{v}_t$$

$$\frac{d}{dt} P_t = F_t P_t + P_t F_t^T + Q$$

$$\text{Avec } F_t = \begin{pmatrix} -(\omega_t)_\times & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -(f_t)_\times & -(\omega_t)_\times & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & -(\omega_t)_\times \end{pmatrix} \text{ et } Q = \begin{pmatrix} Q_\omega & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Q_f \end{pmatrix}$$

15 Ces équations reviennent à intégrer une équation différentielle linéaire à partir des mesures inertielles. Cette équation est la même pour toutes les k particules considérées en entrée de l'itération courante : son calcul peut donc être mis en œuvre une seule fois pour toutes les particules à traiter au cours de l'itération courante.

20 Si l'observation GPS est disponible, le vecteur du deuxième jeu de variables et la covariance associée obtenus à l'issue de l'étape de

propagation sont ensuite mis à jour à la manière d'un filtre de Kalman invariant, au moyen des équations suivantes.

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_{t_n} & \hat{v}_{t_n} & \hat{x}_{t_n} \\ 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{T}_{t_n} & \hat{v}_{t_n} & \hat{x}_{t_n} \\ 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{pmatrix} \exp \left(K_n \hat{T}_{t_n}^T (Y - \hat{b}_{t_n} - \hat{x}_{t_n}) \right)$$

Avec $K_n = P_{t_n} H^T (r^2 I_3 + H P_{t_n} H^T)^{-1}$

La covariance P est elle aussi mise à jour, par la formule suivante :

$$5 \quad P \leftarrow (I_9 - K_n H) P$$

L'étape de mise à jour 304 de la covariance est également effectuée une fois pour toutes les k particules.

On obtient une nouvelle particule, élaborée à partir de la particule de référence, par application des étapes ci-dessus.

- 10 La mise à jour 302 fournit également une vraisemblance pour la nouvelle particule, à partir de laquelle le poids de la nouvelle particule est calculé.

c) Sélection

- 15 L'étape de sélection est mise en œuvre selon le principe général (voir partie I).

d) Estimation

- 20 Certaines variables de l'état ne se prêtent pas une moyenne linéaire, comme par exemple une orientation prenant des valeurs entre -180° et 180° . Une moyenne quelconque sur une variété peut donc être employée, par exemple une de celles exposées dans l'article « On averaging rotations » par Gramkow, C. (2001), dans *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 15(1-2), 7-16.

25

III. Astuces d'implémentation du filtre particulaire invariant dans une centrale de navigation

a) optimisation de mutation

On a vu précédemment que la mutation 101 pouvait tenir compte d'une nouvelle observation.

Dans la mise en œuvre selon la partie II, la mutation comprend une décomposition de Cholesky pour chaque particule, décomposition assez
5 coûteuse en charge de calcul.

La décomposition de Cholesky peut être mise en commun pour les k particules, comme suit : on souhaite obtenir une matrice L vérifiant vérifiant $L * L^T = \hat{T}_{t_n} P_b \hat{T}_{t_n}^T$. Or la matrice P_b ne dépend pas de la particule considérée. On peut donc calculer une fois pour toutes la décomposition
10 de Cholesky $P_b = L_0 * L_0^T$ puis poser pour chaque particule $L = \hat{T}_{t_n} L_0$.

On dispose donc, en sortie de l'étape de mutation 101, de particules plus vraisemblables car tenant compte de la dernière observation, pour une charge plus réduite.

15 *b) mise en commun de calculs de propagation*

On a vu précédemment que l'étape de propagation 302 du deuxième jeu de variables était mise en œuvre pour chacune des k particules dans l'itération courante, et que cette étape de propagation comprenant l'intégration d'une équation différentielle linéaire.

20 De façon connue en elle-même, une telle équation affine est intégrée en deux temps : on détermine d'abord une forme générale de solution avec une inconnue, et on détermine cette inconnue au moyen de conditions initiales, propre à chaque particule. La forme générale de solution, complétée avec la valeur de l'inconnue, devient une solution
25 particulière pour chaque particule.

Dans une implémentation avantageuse du filtre particulaire invariant, il est possible de ne calculer qu'une seule forme générale de la solution, pour toutes les particules, étant donné que cette forme générale est commune à celles-ci.

30 Le seul traitement spécifique à chaque particule est réduit à la détermination des conditions initiales.

Ce principe peut être illustré par les calculs suivants dans la présente application particulière:

Entre deux observations, dont les temps d'arrivée seront notés t_n et t_{n+1} et l'écart $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, les grandeurs suivantes sont calculées une
5 seule fois pour toutes les particules :

$$R_{t_n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \frac{d}{ds} R_s = R_s (\omega_s)_\times, \quad \overline{R_n} = R_{t_{n+1}}$$

$$\overline{\Delta v_n} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} R_s f_s ds$$

$$\overline{\Delta x_n} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left(\int_{t_n}^t R_s f_s ds \right) dt$$

Au moment où arrive l'observation les grandeurs suivantes sont mises à jour pour chaque particule :

$$\hat{x}_{t_n} \leftarrow \hat{x}_{t_n} + \frac{1}{2} \Delta t^2 g + \Delta t \hat{v}_{t_n} + \hat{T}_{t_n} \overline{\Delta x_n}$$

$$\hat{v}_{t_n} \leftarrow \hat{v}_{t_n} + \hat{T}_{t_n} \overline{\Delta v_n} + \Delta t * g$$

$$\hat{T}_{t_n} \leftarrow \hat{T}_{t_n} \overline{R_n}$$

Le procédé général décrit en partie I n'est pas limité à l'application
10 spécifique décrite en partie II. Le filtre particulaire invariant a vocation à être utilisé pour l'estimation de tout état, notamment ceux dont les mesures sont sujettes à des sauts similaires à ceux rencontrés avec des récepteur GPS.

Par exemple, le filtre particulaire invariant peut être utilisé pour
15 estimer la position d'un robot utilisant une caméra de profondeur.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'estimation d'un état représentatif du mouvement d'un système mobile, le procédé mettant en œuvre un filtre particulaire et
5 comprenant les étapes suivantes mises en œuvre à partir d'une particule de référence parmi plusieurs particules précédemment calculées, la particule de référence offrant une estimation de l'état et comprenant un premier jeu de variables et un deuxième jeu de variables:
- mutation aléatoire (101), par le filtre particulaire, du premier jeu
10 de variable en un premier jeu de variable muté,
 - paramétrage (102) d'un filtre de Kalman étendu à l'aide du premier jeu de variable muté,
 - mise en œuvre (103) du filtre de Kalman étendu paramétré pour
15 produire une nouvelle particule à partir du deuxième jeu de variables et de données mesurées par au moins un capteur,
- le procédé étant caractérisé en ce que le filtre de Kalman étendu est du type invariant, et en ce que le deuxième jeu de variables comprend des variables d'orientation, de vitesse et de position du système mobile, le filtre de Kalman étendu invariant étant configuré sous l'hypothèse que :
- 20 – le couple des variables d'orientation et de position présente une propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple, et que
 - le couple des variables d'orientation et de vitesse présente une
25 propriété d'invariance par application d'une rotation ou d'une translation audit couple.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le deuxième jeu de variables comprend une covariance représentative d'une incertitude au sens de Kalman des autres variables du deuxième jeu.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dont les étapes sont répétées pour chacune des particules, et dans lequel le filtre de Kalman utilise une équation de Ricatti commune pour toutes les particules.
- 5 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel l'étape de mutation tient compte de mesures de l'état pour produire le premier jeu de variables muté.
5. Procédé selon la revendication 4, dont les étapes sont répétées pour
10 chacune des particules, l'étape de mutation comprenant une décomposition de Cholesky commune pour toutes les particules.
6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel le filtre de Kalman étendu invariant est mis en œuvre pour une pluralité de
15 particules, ladite mise en œuvre comprend une propagation du deuxième jeu de variables par intégration d'une équation dynamique, l'intégration comprenant, pour une particule de référence :
- la détermination d'une solution générale présentant une forme à au moins une inconnue,
 - 20 – le choix de conditions initiales pour déterminer une solution complète propre à la particule de référence,
- la détermination de la solution générale étant mise en œuvre une seule fois pour toutes les particules.
- 25 7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel le premier jeu contient des variables représentatives d'un biais dans des mesures de radionavigation satellite.
8. Procédé d'estimation de l'état d'un système mobile mis en œuvre par
30 une centrale de navigation comprenant au moins un récepteur (R) de

signaux de radionavigation satellite, au moins un capteur inertiel (CI), le procédé comprenant les étapes suivantes :

- acquisition de mesures (200) par les capteurs (R, CI),
- mise en œuvre des étapes du procédé selon l'une des revendications 1 à 7 pour produire un ensemble de particules à partir des données mesurées,
- estimation (106) de l'état du système mobile à partir de l'ensemble de particules.

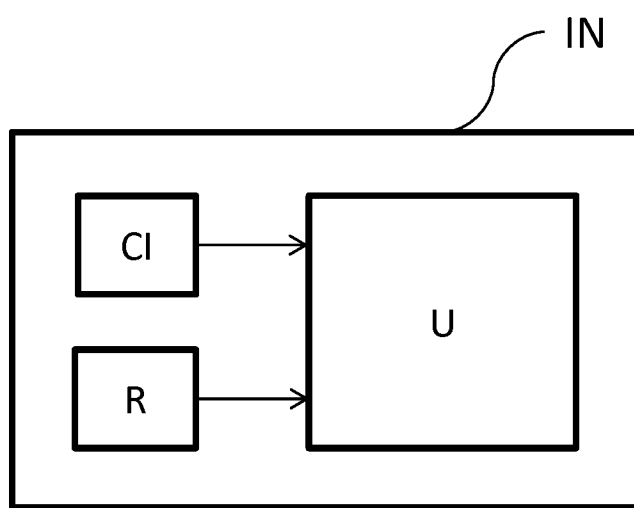
9. Unité de traitement de données mesurées adaptée pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 8.

10. Centrale de navigation (S) comprenant :

- au moins un récepteur (R) de signaux de radionavigation satellite,
- au moins un capteur inertiel (CI),
- une unité (U) de traitement de données de mesure selon la revendication 9 pour estimer un état de navigation de la centrale à partir de mesures acquises par le récepteur et par le capteur inertiel.

11. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes du procédé selon l'une des revendications 1 à 9, lorsque ce programme est exécuté par une unité de traitement de données mesurées.

1/3

FIG. 1

2/3

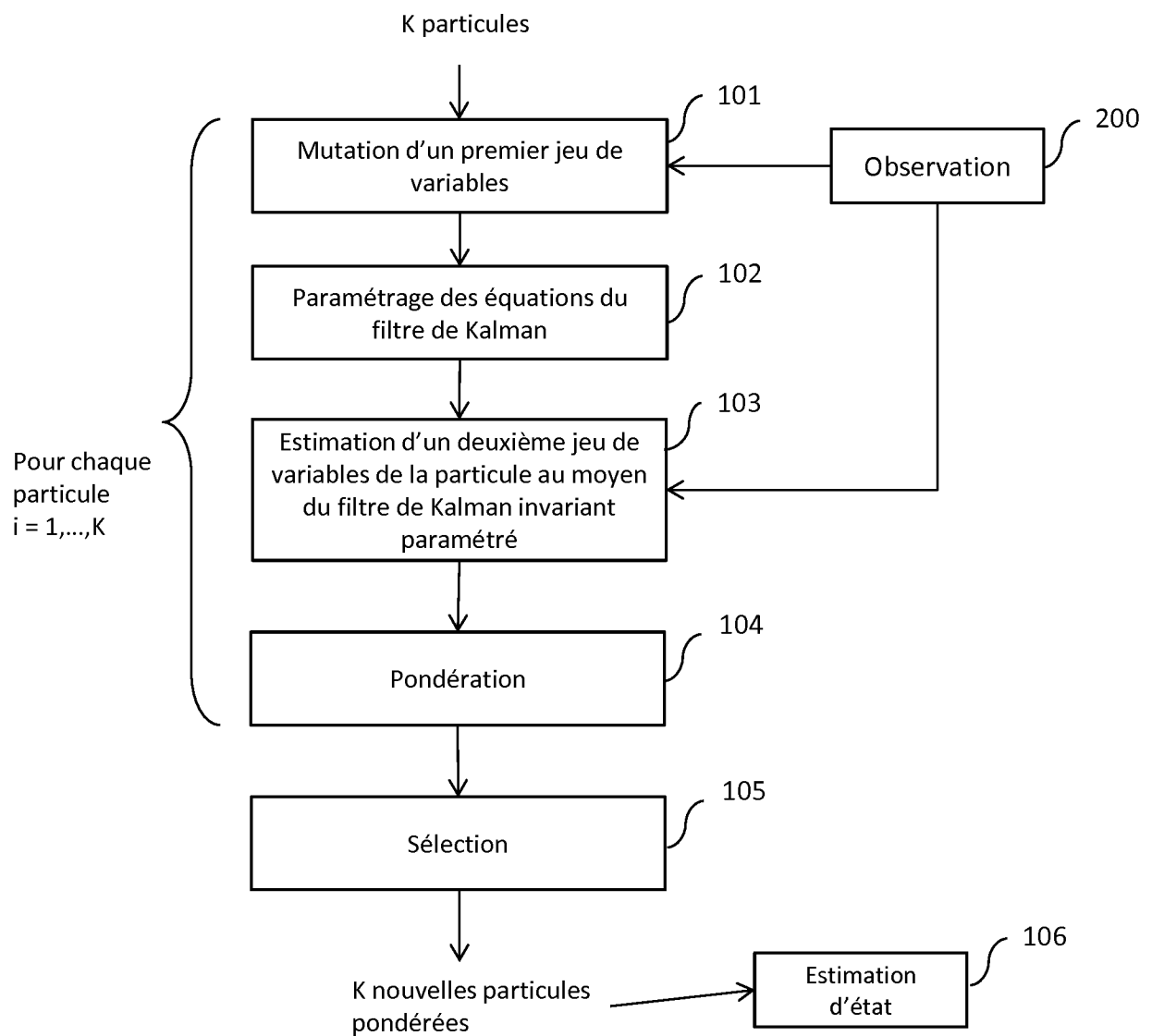


FIG. 2

3/3

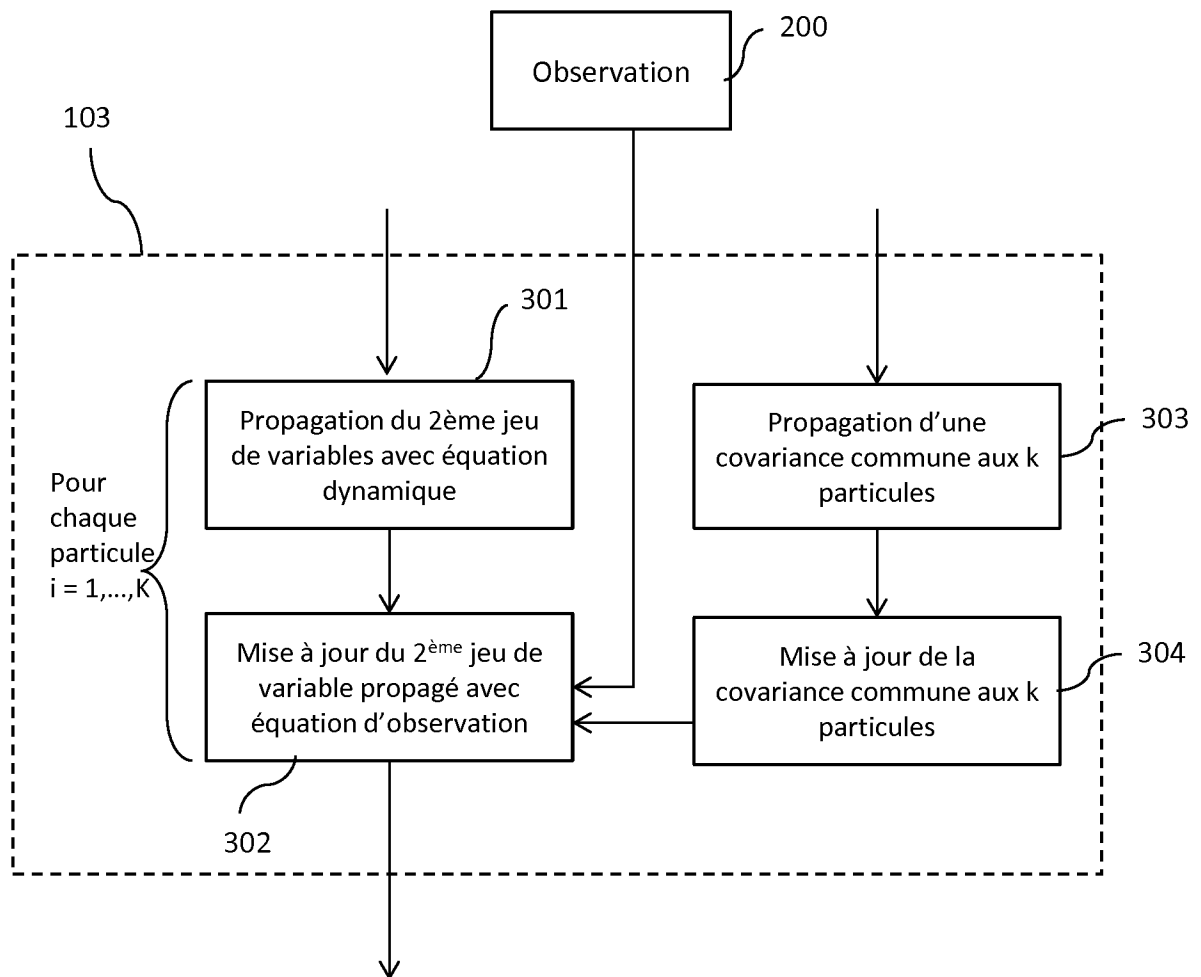


FIG. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/065769A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01S19/49
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)
G01S

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X,P	BARRAU AXEL ET AL: "Invariant particle filtering with application to localization", 53RD IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, IEEE, 15 December 2014 (2014-12-15), pages 5599-5605, XP032733627, DOI: 10.1109/CDC.2014.7040265 ISBN: 978-1-4799-7746-8 [retrieved on 2015-02-11] * page 5600, premier alinéa * * pages 5602-5604, sections IV.A-IV.E * ----- -/-	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 October 2015

Date of mailing of the international search report

09/11/2015

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

Hekmat, Taymoor

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/065769

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CAPPE O ET AL: "An Overview of Existing Methods and Recent Advances in Sequential Monte Carlo", PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE. NEW YORK, US, vol. 95, no. 5, 1 May 2007 (2007-05-01), pages 899-924, XP011186717, ISSN: 0018-9219, DOI: 10.1109/JPROC.2007.893250 * pages 910-912, section G: "Marginalized Particle Filtration" * -----	1-11
A	SILVERE BONNABEL ET AL: "Invariant Extended Kalman Filter: theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem", DECISION AND CONTROL, 2009 HELD JOINTLY WITH THE 2009 28TH CHINESE CONTROL CONFERENCE. CDC/CCC 2009. PROCEEDINGS OF THE 48TH IEEE CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 15 December 2009 (2009-12-15), pages 1297-1304, XP031620108, ISBN: 978-1-4244-3871-6 the whole document -----	1-11
A	WO 2011/064677 A2 (YOST ENGINEERING INC [US]; YOST PAUL W [US]) 3 June 2011 (2011-06-03) figures 4,5 page 9, line 20 - page 19, line 8 -----	1-11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/065769

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2011064677 A2	03-06-2011	EP 2504711 A2	03-10-2012
		US 2012130652 A1	24-05-2012
		US 2012166134 A1	28-06-2012
		US 2013311129 A1	21-11-2013
		WO 2011064677 A2	03-06-2011

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2015/065769

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01S19/49 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01S		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X,P	BARRAU AXEL ET AL: "Invariant particle filtering with application to localization", 53RD IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, IEEE, 15 décembre 2014 (2014-12-15), pages 5599-5605, XP032733627, DOI: 10.1109/CDC.2014.7040265 ISBN: 978-1-4799-7746-8 [extrait le 2015-02-11] * page 5600, premier alinéa * * pages 5602-5604, sections IV.A-IV.E * ----- -/-	1-11
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
16 octobre 2015		09/11/2015
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale		Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Hekmat, Taymoor

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	CAPPE O ET AL: "An Overview of Existing Methods and Recent Advances in Sequential Monte Carlo", PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE. NEW YORK, US, vol. 95, no. 5, 1 mai 2007 (2007-05-01), pages 899-924, XP011186717, ISSN: 0018-9219, DOI: 10.1109/JPROC.2007.893250 * pages 910-912, section G: "Marginalized Particle Filters" * -----	1-11
A	SILVERE BONNABEL ET AL: "Invariant Extended Kalman Filter: theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem", DECISION AND CONTROL, 2009 HELD JOINTLY WITH THE 2009 28TH CHINESE CONTROL CONFERENCE. CDC/CCC 2009. PROCEEDINGS OF THE 48TH IEEE CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 15 décembre 2009 (2009-12-15), pages 1297-1304, XP031620108, ISBN: 978-1-4244-3871-6 le document en entier -----	1-11
A	WO 2011/064677 A2 (YOST ENGINEERING INC [US]; YOST PAUL W [US]) 3 juin 2011 (2011-06-03) figures 4,5 page 9, ligne 20 - page 19, ligne 8 -----	1-11

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2015/065769

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2011064677 A2	03-06-2011	EP 2504711 A2	03-10-2012
		US 2012130652 A1	24-05-2012
		US 2012166134 A1	28-06-2012
		US 2013311129 A1	21-11-2013
		WO 2011064677 A2	03-06-2011
