

⑤④ Dispositif de navigation et de positionnement.

②② Date de dépôt : 08.07.22.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *THALES Société anonyme* — FR.

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 12.01.24 Bulletin 24/02.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 28.06.24 Bulletin 24/26.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : VERCIER Nicolas, Jean-Marc,
Frédéric, CHOPARD Vincent, COATANTIEC Jacques,
BRISSON Grégoire et NGUYEN Emmanuel.

⑦③ Titulaire(s) : *THALES Société anonyme*.

⑦④ Mandataire(s) : Lavoix.



Description

Titre de l'invention : Dispositif de navigation et de positionnement

- [0001] La présente invention concerne un dispositif de navigation et de positionnement, propre à être embarqué à bord d'un véhicule propre à se déplacer entre deux positions géographiques, le dispositif comprenant au moins : une unité de mesure inertielle propre à fournir des mesures de navigation, un récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, une unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, un filtre de Kalman principal en boucle fermée configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies, en entrée dudit filtre de Kalman principal, à la fois par : ladite unité de mesure inertielle, ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, et ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule.
- [0002] L'invention concerne également un véhicule comprenant un tel dispositif de navigation et de positionnement.
- [0003] La présente invention concerne la navigation d'un véhicule (également appelé porteur) propre à se déplacer entre deux positions géographiques, tel qu'un véhicule terrestre correspondant notamment à une voiture, un camion, un véhicule blindé militaire ou civil, un aéronef utilisant, par exemple, un système de navigation aéroportuaire OANS (de l'anglais « *Onboard Airport Navigation System* »).
- [0004] La navigation de tels véhicules, notamment des véhicules terrestres roulants (voiture, camion, chars...) est généralement mise en œuvre à l'aide d'un système de navigation et de positionnement par satellites GNSS (de l'anglais *Global Navigation Satellite System*).
- [0005] Pour ce faire, le véhicule embarque généralement un récepteur de système de navigation et de positionnement par satellites configuré pour déterminer, notamment par trilatération, un positionnement (i.e. une position de géolocalisation ou encore une solution de géolocalisation) de l'aéronef en utilisant des estimations de distances aux satellites visibles d'une même ou de plusieurs constellations de satellites du système de navigation et de positionnement par satellites. Des exemples de systèmes de navigation par satellites sont le système GPS américain, le système GALILEO européen, le système GLONASS russe, ou encore le système BEIDOU chinois, etc.
- [0006] A titre d'alternative, d'autres systèmes de navigation et de positionnement sont basés sur une hybridation d'une unité de mesure inertielle et de la modélisation du déplacement du véhicule utilisant les données fournies par un odomètre ou par un tachymètre.
- [0007] De tels systèmes de navigation et de positionnement présentent une précision du même ordre de grandeur que la localisation par GNSS, en particulier sur des temps de

l'ordre de quelques heures. En revanche, de tels systèmes de navigation et de positionnement nécessitent une position initiale.

[0008] Par ailleurs, tel que décrit dans le brevet FR 3 089 305 B1 pour un aéronef au sol, il existe d'autres systèmes de navigation et de positionnement propres à combiner les deux types de systèmes de navigation et de positionnement précités, et basée sur une hybridation dite « lâche » (ou hybridation en axes géographiques) en utilisant notamment la position GNSS (e.g. GPS) pour recalibrer la centrale inertielle. Une telle hybridation est nommée par la suite INS/VEH/GNSS, avec « INS » pour représenter la contribution à l'hybridation de l'unité de mesure inertielle (INS de l'anglais *Inertial Navigation System*), « VEH » pour « véhicule » pour représenter la contribution à l'hybridation d'une unité de modélisation de déplacement du véhicule, ladite unité de modélisation étant propre à déterminer le recalage transverse et vertical du véhicule, ainsi que le recalage longitudinal du véhicule via un odomètre ou un tachymètre, et « GNSS » tel que précité.

[0009] Cependant, l'hybridation INS/VEH/GNSS mise en œuvre selon les techniques actuelles n'est pas optimale pour se prémunir :

[0010] - d'erreurs du GNSS en cas de panne satellite, de défaut logiciel ou matériel du GNSS, de multi-trajets, ou encore d'interférence intentionnelle ou non,

[0011] - d'erreurs VEH fournie par l'unité de modélisation de déplacement du véhicule notamment en cas de comportements du véhicule non modélisés tels que des dérapages excessifs, ou encore des glissades, ou encore du fait d'un odomètre ou d'un tachymètre défectueux, ou en présence de patinage du véhicule,

[0012] ni pour fournir un positionnement intègre lorsque de telles erreurs GNSS et/ou VEH se produisent.

[0013] Le but de l'invention est alors de proposer un dispositif de navigation et de positionnement qui permette au moins de maintenir l'intégrité du positionnement indépendamment de la vulnérabilité des mesures GNSS et/ou VEH.

[0014] A cet effet l'invention a pour objet un dispositif de navigation et de positionnement, propre à être embarqué à bord d'un véhicule propre à se déplacer entre deux positions géographiques, le dispositif comprenant au moins :

[0015] - une unité de mesure inertielle propre à fournir des mesures de navigation,

[0016] - un récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS,

[0017] - une unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,

[0018] - un filtre de Kalman principal en boucle fermée configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies, en entrée dudit filtre de Kalman principal, à la fois par :

[0019] - ladite unité de mesure inertielle,

[0020] - ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, et

- [0021] - ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,
- [0022] le dispositif comprenant en outre en sortie dudit filtre de Kalman principal au moins deux sous-filtres de Kalman distincts comprenant :
- [0023] - un premier sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle et par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS,
- [0024] - un deuxième sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle et par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,
- [0025] chaque sous-filtre de Kalman étant propre à :
- [0026] - appliquer la correction hybride fournie, en entrée à chaque cycle, par le filtre de Kalman principal lors de sa phase de propagation, et
- [0027] - déterminer un positionnement dudit véhicule associé audit sous-filtre de Kalman considéré en appliquant la correction calculée par ledit sous-filtre de Kalman au positionnement hybride obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal.
- [0028] Ainsi le dispositif de navigation et de positionnement selon la présente invention présente une architecture particulière permettant de consolider les différentes informations dans une localisation INS/VEH/GNSS, avec hybridation GNSS lâche ou serrée (lorsque le récepteur de mesures de positionnement par satellites GNSS fournit les informations extraites en amont par le récepteur GNSS que sont les pseudo-distances et les pseudo-vitesses (grandeurs directement issues de la mesure du temps de propagation et de l'effet Doppler des signaux émis par les satellites en direction du récepteur)), afin de maintenir en quasi-permanence, voire permanence, l'intégrité de la localisation associée.
- [0029] Pour ce faire, ladite architecture particulière fournit une position principale INS/VEH/GNSS via le filtre de Kalman principal, et des positions supplémentaires INS/GNSS et INS/VEH qui ne contiennent respectivement que des informations INS et GNSS (sans VEH) et INS et VEH (sans GNSS). Ces positions supplémentaires INS/GNSS et INS/VEH sont issues des premier, deuxième, et troisième sous-filtres de Kalman aux écarts du filtre de Kalman principal (INS/VEH/GNSS).
- [0030] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, le dispositif de navigation et de positionnement comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0031] - le dispositif comprend également un module de vérification d'intégrité configuré pour :
- [0032] - contrôler, à chaque cycle, l'intégrité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou l'intégrité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, en

- comparant, à un seuil prédéterminé, l'écart entre l'état de chaque sous-filtre de Kalman et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0033] - en cas d'écart supérieur audit seuil prédéterminé, lever une alarme propre à signaler une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS ;
 - [0034] - le dispositif est configuré pour comparer :
 - [0035] - à un seuil prédéterminé pour la latitude, l'écart entre l'état de position de latitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de latitude du filtre de Kalman principal,
 - [0036] - à un seuil prédéterminé pour la longitude, l'écart entre l'état de position de longitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de longitude du filtre de Kalman principal,
 - [0037] - à un seuil prédéterminé pour l'altitude l'écart entre l'état de position de l'altitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de l'altitude, du filtre de Kalman principal, et
 - [0038] pour lever une alarme dès qu'au moins un écart associé à l'une des composantes latitude, longitude, altitude est supérieur au seuil prédéterminé correspondant et associé respectivement à chacune des composantes latitude, longitude, altitude ;
 - [0039] - le dispositif est également configuré pour déterminer ledit seuil prédéterminé en fonction d'une probabilité de fausse alarme prédéterminée ;
 - [0040] - le dispositif comprend en outre en sortie dudit filtre de Kalman un troisième sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle, et en cas de levée d'alarme, le filtre de Kalman principal, le premier sous-filtre de Kalman et le deuxième sous-filtre de Kalman sont également propres à se reconfigurer sur le troisième sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle ;
 - [0041] - le filtre de Kalman principal, le premier sous-filtre de Kalman et le deuxième sous-filtre de Kalman se reconfigurent chacun en remplaçant leur propre état et leur propre matrice de covariance respectivement par l'état et la matrice de covariance du troisième sous-filtre de Kalman ;
 - [0042] - le dispositif est également configuré pour déterminer un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou d'une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, ledit rayon de protection garantissant que la valeur de la distance entre la position hybride fournie à partir dudit filtre principal de Kalman et la position vraie dudit véhicule est inférieure à

la valeur dudit rayon de protection, ledit rayon de protection étant déterminé en déterminant un rayon de protection associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :

- [0043] - un coefficient associé à une probabilité de fausse alarme prédéterminée,
- [0044] - la matrice de covariance de l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0045] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
- [0046] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- [0047] ledit rayon de protection étant le plus grand des rayons de protection associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.
- [0048] - le dispositif est également configuré pour déterminer un rayon d'incertitude, ledit rayon d'incertitude étant déterminé en déterminant un rayon d'incertitude associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :
- [0049] - l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0050] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
- [0051] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- [0052] ledit rayon d'incertitude étant le plus grand des rayons d'incertitude associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.
- [0053] - le dispositif comprend en outre un module d'initialisation de la position dudit véhicule configuré pour initialiser la position dudit véhicule en utilisant au moins un des éléments appartenant au groupe comprenant au moins :
- [0054] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS,
- [0055] - une mesure de positionnement consolidée à partir de plusieurs sources GNSS distinctes,
- [0056] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif,
- [0057] - une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0058] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0059] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif.
- [0060] L'invention a également pour objet un véhicule comprenant un tel dispositif de navigation et de positionnement.
- [0061] L'invention a également pour objet un procédé de navigation et de positionnement mis en œuvre par ledit dispositif de navigation et de positionnement selon la présente invention tel que décrit précédemment, et comprenant les étapes suivantes mises en

œuvre à chaque cycle du filtre de Kalman principal et de chaque sous-filtre de Kalman :

- [0062] - localisation dudit véhicule en utilisant les corrections fournies respectivement par le filtre de Kalman principal et par chaque sous-filtre de Kalman,
- [0063] - contrôle à chaque cycle, de l'intégrité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou l'intégrité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, en comparant, à un seuil prédéterminé, l'écart entre l'état de chaque sous-filtre de Kalman et l'état du filtre de Kalman principal:
- [0064] - en cas d'écart supérieur audit seuil prédéterminé :
- [0065] - levée d'une alarme propre à signaler une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS
- [0066] - reconfiguration du premier sous-filtre de Kalman et du deuxième sous-filtre de Kalman sur un troisième sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle ;
- [0067] - en absence d'écart supérieur audit seuil prédéterminé :
- [0068] - détermination d'un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou d'une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, ledit rayon de protection garantissant que la valeur de la distance entre la position hybride fournie à partir dudit filtre principal de Kalman et la position vraie dudit véhicule est inférieure à la valeur dudit rayon de protection, ledit rayon de protection étant déterminé en déterminant un rayon de protection associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :
- [0069] - un coefficient associé à une probabilité de fausse alarme prédéterminée,
- [0070] - la matrice de covariance de l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0071] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
- [0072] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- [0073] ledit rayon de protection étant le plus grand des rayons de protection associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.
- [0074] - détermination d'un rayon d'incertitude, ledit rayon d'incertitude étant déterminé en déterminant un rayon d'incertitude associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de

Kalman :

- [0075] - l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0076] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée ;
- [0077] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman ;
- [0078] ledit rayon d'incertitude étant le plus grand des rayons d'incertitude associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.
- [0079] Selon un aspect particulier dudit procédé, ledit contrôle consiste à comparer :
- [0080] - à un seuil prédéterminé pour la latitude, l'écart entre l'état de position de latitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de latitude du filtre de Kalman principal,
- [0081] - à un seuil prédéterminé pour la longitude, l'écart entre l'état de position de longitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de longitude du filtre de Kalman principal,
- [0082] - à un seuil prédéterminé pour l'altitude l'écart entre l'état de position de l'altitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de l'altitude, du filtre de Kalman principal, et
- [0083] - pour lever une alarme dès qu'au moins un écart associé à l'une des composantes latitude, longitude, altitude est supérieur au seuil prédéterminé correspondant et associé respectivement à chacune des composantes latitude, longitude, altitude.
- [0084] Selon un autre aspect particulier dudit procédé, le procédé comprend en outre la détermination dudit seuil prédéterminé en fonction d'une probabilité de fausse alarme prédéterminée.
- [0085] Selon un autre aspect particulier dudit procédé, le procédé comprend en outre une étape d'initialisation de la position dudit véhicule en utilisant au moins un des éléments appartenant au groupe comprenant au moins :
- [0086] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS,
- [0087] - une mesure de positionnement consolidée à partir de plusieurs sources GNSS distinctes,
- [0088] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif,
- [0089] - une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0090] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0091] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif.
- [0092] L'invention a également pour objet un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, mettent en

œuvre un tel procédé de navigation et de positionnement par satellites tel que défini ci-dessus.

- [0093] Ces caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :
- [0094] - [Fig.1] la [Fig.1] est un schéma illustrant un dispositif de navigation et de positionnement propre à mettre en œuvre une hybridation INS/VEH/GNSS ;
- [0095] - [Fig.2] la [Fig.2] est un schéma illustrant l'architecture du dispositif de navigation et de positionnement selon la présente invention ;
- [0096] - [Fig.3] la [Fig.3] illustre le principe de boucle fermée mis en œuvre par le filtre de Kalman principal ;
- [0097] - [Fig.4] la [Fig.4] illustre au moyen d'une représentation du rayon de protection une situation où le filtre de Kalman principal est corrompu.
- [0098] La [Fig.1] est une représentation globale d'un dispositif 10 de navigation et de positionnement selon la présente invention, propre à mettre en œuvre une hybridation INS/VEH/GNSS, et comprenant au moins une unité 12 de mesure inertielle propre à fournir des mesures de navigation, notamment à une plateforme virtuelle 14 de calcul et de localisation, un récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS, une unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et un filtre de Kalman K, dit principal par la suite.
- [0099] L'unité de mesure inertielle 12 est constituée d'un ensemble de capteurs inertiels tels que des gyromètres et des accéléromètres associés à une électronique de traitement et est propre à fournir des incréments 20 de rotation angulaires et de vitesse du véhicule dans lequel le dispositif 10 de navigation et de positionnement est embarqué.
- [0100] La plateforme virtuelle de calcul 14 intègre de tels incréments 20 de rotation angulaires et de vitesse pour fournir, en entrée filtre de Kalman principal K, des données 22 de navigation, telles que l'orientation du véhicule (i.e. son attitude), en termes de roulis, tangage, lacet, cap, etc, la vitesse du véhicule par exemple la vitesse V_{Nord} selon la direction Nord, la vitesse V_{Est} selon la direction Est, la vitesse V_{bas} au bas de la trajectoire etc., et la position du véhicule par exemple en latitude, longitude, altitude.
- [0101] Le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS est propre à fournir selon la flèche 24 des informations de position et de vitesse du véhicule par triangulation à partir des signaux émis par des satellites défilants visibles du véhicule. Les informations fournies peuvent être momentanément indisponibles car le récepteur doit avoir en vue directe un minimum de quatre satellites du système de positionnement pour pouvoir faire un point. Elles sont en outre d'une précision variable, dépendant de la géométrie de la constellation à la base de la triangulation, et bruitées car reposant sur la réception de signaux de très faibles niveaux provenant de satellites

éloignés ayant une faible puissance d'émission. Mais elles ne souffrent pas de dérive à long terme, les positions des satellites défilant sur leurs orbites étant connues avec précision sur le long terme. Les bruits et les erreurs peuvent être liés aux systèmes satellitaires, au récepteur ou à la propagation du signal entre l'émetteur satellitaire et le récepteur de signaux GNSS. En outre, les données satellites peuvent être erronées par suite de pannes affectant les satellites. Ces données non intègres doivent alors être repérées pour ne pas fausser la position issue du récepteur GNSS.

- [0102] L'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule est configurée pour fournir des mesures de :
- [0103] - déplacement longitudinal du véhicule à partir de données fournies par un odomètre ou par un tachymètre,
- [0104] - déplacement transverse, supposé nul pour un véhicule terrestre (i.e. se déplaçant au sol),
- [0105] - déplacement vertical du véhicule, également supposé nul pour un véhicule terrestre.
- [0106] L'hybridation mise en œuvre par le filtre de Kalman principal K consiste à combiner mathématiquement les mesures 22, 24, 26 fournies respectivement par l'unité de mesure inertielle 12, le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS, et l'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule pour obtenir des informations de position et de vitesse en tirant avantage des trois éléments 12 INS, 16 GNSS et 18 VEH.
- [0107] Le filtrage de Kalman s'appuie sur les possibilités de modélisation de l'évolution de l'état d'un système physique considéré dans son environnement, au moyen d'une équation dite "d'évolution" (estimation a priori), et de modélisation de la relation de dépendance existant entre les états du système physique considéré et les mesures d'un capteur externe, au moyen d'une équation dite "d'observation" pour permettre un recalage des états du filtre (estimation a posteriori). Dans un filtre de Kalman, la mesure effective ou "vecteur de mesure" permet de réaliser une estimée a posteriori de l'état du système qui est optimale dans le sens où elle minimise la covariance de l'erreur faite sur cette estimation. La partie estimateur du filtre génère des estimées a posteriori du vecteur d'état du système en utilisant l'écart constaté entre le vecteur de mesure effectif et sa prédiction a priori pour engendrer un terme correctif, appelé innovation. Cette innovation, après une multiplication par un vecteur gain du filtre de Kalman, est appliquée à l'estimée a priori du vecteur d'état du système et conduit à l'obtention de l'estimée optimale a posteriori.
- [0108] Le filtrage de Kalman mis en œuvre par le filtre de Kalman principal K modélise notamment l'évolution des erreurs de l'unité de mesure inertielle 12 et délivre l'estimée a posteriori de ces erreurs qui sert à corriger le point de positionnement et de vitesse de l'unité de mesure inertielle 12.

- [0109] La correction INS/VEH/GNSS 28 des erreurs par le biais de leur estimation faite par le filtre de Kalman principal K est alors réalisée en entrée de la plateforme virtuelle 14 selon une architecture dite en « boucle fermée » telle qu'illustrée par la [Fig.1] permettant de garder des erreurs de navigation faibles et donc de rester dans le domaine linéaire le filtre de Kalman principal K. La plateforme virtuelle 14 utilise une telle correction INS/VEH/GNSS 28 pour élaborer l'estimée optimale 30 de la position INS/VEH/GNSS et de la vitesse du véhicule.
- [0110] L'hybridation est dite « lâche » (ou hybridation en axes géographiques) lorsque le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS fournit la position et la vitesse du véhicule résolues par le récepteur GNSS.
- [0111] L'hybridation est dite « serrée » lorsque le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS fournit les informations extraites en amont par le récepteur GNSS que sont les pseudo-distances et les pseudo-vitesses (grandeurs directement issues de la mesure du temps de propagation et de l'effet Doppler des signaux émis par les satellites en direction du récepteur).
- [0112] Avec un tel dispositif 10 de navigation et de positionnement par hybridation INS/VEH/GNSS en boucle fermée où le point, résolu par le récepteur 16 GNSS et l'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, est utilisé pour recalibrer les informations provenant de l'unité de mesure inertielle 12, il est nécessaire de surveiller les défauts affectant les informations fournies par les satellites car le récepteur 16 qui les reçoit propagera ces défauts à l'unité de mesure inertielle 12 en entraînant un mauvais recalage de cette dernière, il en est de même pour l'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule dont les défauts sont également propres à être propagés à l'unité de mesure inertielle 12.
- [0113] Pour ce faire, le dispositif 10 de navigation et de positionnement par hybridation INS/VEH/GNSS est complété tel qu'illustré par la [Fig.2] pour obtenir le dispositif D selon la présente invention, un tel dispositif D présentant une architecture particulière décrite ci-après.
- [0114] Le dispositif D comprend en effet, selon la présente invention au moins deux sous-filtres de Kalman distincts SF_1 et SF_2 .
- [0115] Le premier sous-filtre de Kalman SF_1 est configuré pour calculer des corrections INS/GNSS 32 de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle 12 et par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS. Le premier sous-filtre de Kalman SF_1 est propre à appliquer la correction hybride INS/VEH/GNSS 28 fournie par le filtre de Kalman principal K en entrée à chaque cycle, lors de sa propre phase de propagation, et à déterminer, notamment via l'élément de combinaison 34, un positionnement INS/GNSS 36 dudit véhicule associé audit premier sous-filtre SF_1 de Kalman considéré en appliquant la

correction INS/GNSS 32 calculée par ledit sous-filtre de Kalman SF_1 au positionnement hybride 30 INS/VEH/GNSS obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal K.

- [0116] De manière similaire, le dispositif D comprend le deuxième sous-filtre de Kalman SF_2 configuré pour calculer des corrections 38 INS/VEH de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle 12 et par ladite unité de modélisation de déplacement(s) 18 dudit véhicule. Le deuxième sous-filtre de Kalman SF_2 est propre à appliquer la correction hybride INS/VEH/GNSS 28 fournie par le filtre de Kalman principal K en entrée à chaque cycle, lors de sa propre phase de propagation, et à déterminer, notamment via l'élément de combinaison 40, un positionnement INS/VEH 42 dudit véhicule associé audit deuxième sous-filtre SF_2 de Kalman considéré en appliquant la correction INS/VEH 38 calculée par ledit deuxième sous-filtre de Kalman SF_2 au positionnement hybride 30 INS/VEH/GNSS obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal K.
- [0117] Tel que représenté sur la [Fig.2], le dispositif D comprend en outre optionnellement un troisième sous-filtre de Kalman SF_3 configuré pour calculer des corrections 44 INS de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle. Le troisième sous-filtre de Kalman SF_3 est propre à appliquer la correction hybride INS/VEH/GNSS 28 fournie par le filtre de Kalman principal K en entrée à chaque cycle, lors de sa propre phase de propagation, et à déterminer, notamment via l'élément de combinaison 46, un positionnement INS 48 dudit véhicule associé audit troisième sous-filtre SF_3 de Kalman considéré en appliquant la correction INS 44 calculée par ledit troisième sous-filtre de Kalman SF_3 au positionnement hybride 30 INS/VEH/GNSS obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal K.
- [0118] Autrement dit, selon l'architecture de la [Fig.2], chaque sous-filtre de Kalman SF_1, SF_2 et SF_3 est propre à :
- [0119] - appliquer la correction hybride fournie, en entrée à chaque cycle, par le filtre de Kalman principal lors de sa phase de propagation, et
- [0120] - déterminer un positionnement dudit véhicule associé audit sous-filtre de Kalman considéré en appliquant la correction calculée par ledit sous-filtre de Kalman au positionnement hybride 30 obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal K.
- [0121] Ainsi, la présente invention propose de déterminer les positions 36, 42 hybrides respectivement INS/VEH, INS/GNSS et optionnellement la position inertielle INS à partir de la position hybride 30 INS/VEH/GNSS et des corrections issues des premier et deuxième sous-filtres de Kalman SF_1 : INS/VEH, SF_2 : INS/GNSS, et optionnellement du troisième sous-filtre INS.
- [0122] Selon l'exemple de la [Fig.2], le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention comprend en outre un module 50 de vérification d'intégrité

configuré pour :

- [0123] - contrôler, à chaque cycle, l'intégrité desdites données fournies par ladite unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou l'intégrité desdites données fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, en comparant, à un seuil prédéterminé, l'écart entre l'état de chaque sous-filtre de Kalman SF_1 , SF_2 (et optionnellement SF_3) et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0124] - en cas d'écart supérieur audit seuil prédéterminé, lever une alarme propre à signaler une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS.
- [0125] A titre d'alternative à la mise en œuvre automatique (i.e. sans intervention humaine), via ledit module 50 de vérification d'intégrité, de ladite comparaison, cette comparaison, et le cas échéant levée d'alarme pourraient être mise en œuvre par un dispositif non représenté distinct dudit dispositif D, ou par un utilisateur au prix du temps de traitement mental associé.
- [0126] Selon une variante non représentée, le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention illustré par la [Fig.2] comprend en outre une unité de traitement formée par exemple d'une mémoire et d'un processeur associé à la mémoire, et le dispositif D est au moins en partie réalisé sous forme d'un logiciel, ou d'une brique logicielle, exécutable par le processeur, notamment l'ensemble de Kalman comprenant le filtre de Kalman principal K et les sous-filtres de Kalman SF_1 , SF_2 (et optionnellement SF_3), la plateforme virtuelle 14 de calcul et de localisation, les éléments de combinaison 34, 40 et optionnellement module 50 de vérification d'intégrité. La mémoire du dispositif D de navigation et de positionnement est alors apte à stocker de tels logiciels ou briques logicielles, et le processeur est alors apte à les exécuter.
- [0127] En variante non représentée, l'ensemble de Kalman comprenant le filtre de Kalman principal K et les sous-filtres de Kalman SF_1 , SF_2 (et optionnellement SF_3), la plateforme virtuelle 14 de calcul et de localisation, les éléments de combinaison 34, 40 et optionnellement module 50 de vérification d'intégrité sont réalisés chacun sous forme d'un composant logique programmable, tel qu'un FPGA (de l'anglais Field Programmable Gate Array), ou encore sous forme d'un circuit intégré dédié, tel qu'un ASIC (de l'anglais Application Specific integrated Circuit).
- [0128] Lorsqu'une partie du dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention est réalisée sous forme d'un ou plusieurs logiciels, c'est-à-dire sous forme d'un programme d'ordinateur, cette partie est en outre apte à être enregistrée sur un support, non représenté, lisible par ordinateur. Le support lisible par ordinateur est par exemple, un médium apte à mémoriser des instructions électroniques et à être

couplé à un bus d'un système informatique. A titre d'exemple, le support lisible est un disque optique, un disque magnéto-optique, une mémoire ROM, une mémoire RAM, tout type de mémoire non-volatile (par exemple EPROM, EEPROM, FLASH, NVRAM), une carte magnétique ou encore une carte optique. Sur le support lisible est alors mémorisé un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles.

[0129] La [Fig.3] illustre le principe de la boucle fermée appliquée au filtre de Kalman principal K, avec l'état X du filtre de Kalman principal K, et P sa matrice de covariance. Un module 64 de propagation du filtre de Kalman principal K est configuré pour propager l'état à l'aide des équations de navigation, et un module 66 de recalage permet d'estimer l'état à l'aide des mesures GNSS fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites GNSS et des mesures de l'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule. Les équations de propagation et de recalage en boucle fermée sont pour le recalage mis en œuvre par le module 66 :

$$[0130] \quad K_n = P_{n/n-1} H^T (R_n + H P_{n/n-1} H^T)^{-1}$$

$$[0131] \quad X_{n/n} = X_{n/n-1} + K_n (Z_n - H X_{n/n-1})$$

$$[0132] \quad P_{n/n} = (I - K_n H) P_{n/n-1}$$

[0133] et pour la propagation mise en œuvre par le module 64 :

$$[0134] \quad P_{n+1/n} = F_{n+1} P_{n/n} F_{n+1}^T + Q_{n+1}$$

$$[0135] \quad X_{n+1/n} = F_{n+1} X_{n/n} - Cor_n$$

$$[0136] \quad Cor_{n+1} = X_{n+1/n}$$

[0137] avec F la matrice de propagation, Q la matrice de bruit de modèle, R la matrice de covariance du bruit de mesure, H la matrice d'observation, K le gain de Kalman et Z le vecteur d'observation obtenu à partir du récepteur 16 et de l'unité 18, $X_{n+1/n}$ le vecteur d'état propagé après propagation entre les deux instants temporels successifs n et $n+1$. La matrice de covariance $P_{n+1/n}$ et le vecteur d'état $X_{n+1/n}$ sont stockés dans la mémoire M₁, pour une itération suivante à l'instant $n+1$.

[0138] Pour chaque sous-filtre, noté SF, de la [Fig.2] parmi les sous-filtres SF₁, SF₂ et SF₃, on utilise les équations classiques du filtrage de Kalman en appliquant Cor_{n+1}, la correction 28 INS/VEH/GNSS du filtre principal K au moment de la propagation.

[0139] Recalage :

$$[0140] \quad K^{SF} = P_{n/n-1}^{SF} H^{SF T} (R + H^{SF} P_{n/n-1}^{SF} H^{SF T})^{-1}$$

$$[0141] \quad X_{n+1/n+1}^{SF} = X_{n+1/n}^{SF} + K^{SF} (Z^{SF} - H^{SF} X_{n+1/n}^{SF})$$

$$[0142] \quad P_{n/n}^{SF} = (I - K^{SF} H^{SF}) P_{n/n-1}^{SF}$$

[0143] Propagation :

$$[0144] \quad P_{n+1/n}^{SF} = F P_{n/n}^{SF} F^T + Q$$

[0145] $X_{n+1/n}^{SF} = F X_{n/n}^{SF} - Cor_n$

[0146] Avec Cor_n la correction issue du filtre principal K, Z^{SF} le vecteur d'observation qui est un sous ensemble de Z du filtre principal de Kalman K. Z^{SF} contient seulement les observations liées au sous-filtre SF, GNSS obtenues à partir du récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites(s) GNSS pour le premier sous-filtre SF₁ INS/GNSS, VEH obtenues à partir de l'unité 18 de modélisation de déplacement du véhicule pour le deuxième sous-filtre SF₂ INS/VEH, et optionnellement aucune observation (i.e. Ni VEH, ni GNSS) pour le troisième sous-filtre SF₃ INS optionnel. De plus, H^{SF} est la matrice d'observation qui contient les lignes de H du filtre principal de Kalman K liées aux observations du sous-filtre SF considéré parmi les sous-filtres SF₁, SF₂ et optionnellement SF₃ précités, K^{SF} est le gain du sous filtre SF considéré parmi les sous-filtres SF₁, SF₂ et optionnellement SF₃ précités, et P^{SF} est la matrice de covariance du sous filtre SF considéré parmi les sous-filtres SF₁, SF₂ et optionnellement SF₃ précités.

[0147] Sur la [Fig.2], la position 36 de la sous-solution INS/GNSS associée au premier sous-filtre SF₁ ne contient que des informations de l'unité de mesure inertielle 12 (UMI) et du récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites(s) GNSS. Elle n'est donc pas corrompue par une mesure erronée VEH de l'unité 18 de modélisation de déplacement du véhicule.

[0148] De manière similaire, la position 42 de la sous-solution INS/VEH associée au deuxième sous-filtre SF₂ ne contient que des informations de l'unité de mesure inertielle 12 (UMI) et de l'unité 18 de modélisation de déplacement du véhicule VEH. Elle n'est donc pas corrompue par une mesure erronée GNSS fournie par le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites(s) GNSS.

[0149] Optionnellement, la position 48 de la sous-solution INS associée au troisième sous-filtre optionnel SF₃ ne contient que des informations de l'unité de mesure inertielle 12 (UMI). Elle n'est donc pas corrompue par une mesure erronée GNSS fournie par le récepteur 16 de mesures de positionnement par satellites(s) GNSS ni par une mesure erronée VEH de l'unité 18 de modélisation de déplacement du véhicule VEH.

[0150] Plus précisément, à chaque cycle du filtre de Kalman principal K, la correction de chaque sous filtre Cor^{SF} est appliquée à la position principale 30 (i.e. associée à la solution principale INS/VEH/GNSS) pour obtenir la position associée au sous-filtre SF considéré parmi les sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ (et optionnellement SF₃) selon l'équation suivante :

[0151] $Cor_{n+1}^{SF} = X_{n+1/n}^{SF} - Cor_{n+1} = X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n}$

[0152] ce qui revient à :

[0153] $Lat^{SF} = Lat^{INS/VEH/GNSS} + Cor^{SF}(Lat)$

[0154] $Lon^{SF} = Lon^{INS/VEH/GNSS} + Cor^{SF}(Lon)$

[0155] $Alt^{SF} = Alt^{INS/VEH/GNSS} + Cor^{SF}(Alt)$

[0156] avec Lat, la latitude ; Lon la longitude ; Alt, l'altitude. SF étant un sous-filtre considéré parmi les sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ (et optionnellement SF₃) associée respectivement aux solutions d'hybridations INS/GNSS, INS/VEH, et INS.

[0157] Si une mesure GNSS est erronée, elle va corrompre la solution principale INS/VEH/GNSS mais pas la solution INS/VEH associée au sous-filtre SF₂, ni la solution optionnelle INS associée au sous-filtre SF₃. De même, si une mesure erronée VEH est fournie par l'unité 18 de modélisation de déplacement du véhicule VEH, elle va corrompre la solution principale INS/VEH/GNSS mais pas la solution INS/GNSS associée au sous-filtre SF₁, ni la solution optionnelle INS associée au sous-filtre SF₃.

[0158] Le module de vérification d'intégrité 50 est alors configuré pour détecter un erroné GNSS ou VEH, en calculant l'écart entre la position principale INS/VEH/GNSS et la position de chaque sous-solution associée respectivement à chaque sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ (et optionnellement SF₃). Si l'écart est trop grand, il y a un erroné. S'il est petit, il n'y a pas d'erroné.

[0159] Autrement dit, une telle différence entre les différentes solutions INS/VEH/GNSS, INS/GNSS, INS/VEH, et optionnellement INS, respectivement associées au filtre de Kalman principal K et aux sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ (et optionnellement SF₃) est contrôlée par un écart V tel que : $Cor_{n+1}^{SF} = X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n} = V_{n+1}^{SF}$ calculé à chaque cycle de Kalman entre les états de position du sous-filtre $X_{n+1/n}^{SF}$ et du filtre principal $X_{n+1/n}$.

[0160] Cet écart est plus ou moins important selon l'état étudié, et incohérent avec la covariance de l'écart des états, les états de position X en question correspondant par exemple aux états de position latitude, longitude, altitude, ou tout autre état possible, notamment le roulis, le tangage, le cap, la vitesse nord, la vitesse est, etc., qui sont très sensibles aux erreurs, la variable de test correspondant à l'écart entre le filtre principal de Kalman K et le sous-filtre considéré parmi les sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ (et optionnellement SF₃) est alors exprimée sous la forme suivante :

[0161] $V_{Lat} = X_{n+1/n}^{SF}(Lat) - X_{n+1/n}(Lat)$

[0162] $V_{Lon} = X_{n+1/n}^{SF}(Lon) - X_{n+1/n}(Lon)$

[0163] $V_{Alt} = X_{n+1/n}^{SF}(Alt) - X_{n+1/n}(Alt)$

[0164] Plus précisément, le module de vérification d'intégrité 50 est configuré pour contrôler au court du temps pour chaque sous-filtre l'écart $E = V_X = X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n}$ en le comparant, via un seuil prédéterminé, à la covariance de l'écart des états.

[0165] En effet, en considérant que les matrices d'observation de chaque sous-filtre H^{SF} et de bruit de mesure R^{SF} sont des sous matrices des matrices d'observation H et de bruit

de mesure R du filtre de Kalman principal K où les lignes (respectivement colonnes) liées aux mesures GNSS ont été mises à zéro (le reste étant identique entre sous-filtre et filtre principal), et que les matrices de propagation F et de bruit de modèle Q sont identiques entre sous-filtre et filtre principal, alors il est démontrable par récurrence par l'homme du métier que l'espérance de $\left((X - X^{SF}) (X - X^{SF})^T \right)$ est égale à la différence de matrice de covariance $P^{SF} - P$, ce qui en développant revient à une espérance de $\left(X X^{SF^T} \right)$ égale à P la matrice de covariance du filtre K de Kalman principal.

- [0166] Selon un aspect complémentaire optionnel, le module de vérification d'intégrité 50 détermine lui-même, ledit seuil utilisé pour comparer l'écart $E = V_X = X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n}$ à la covariance de l'écart des états.
- [0167] Selon un exemple de cet aspect complémentaire optionnel, le dispositif D, via son module de vérification d'intégrité 50, est configuré pour comparer :
- [0168] - à un seuil prédéterminé pour la latitude, l'écart V_{Lat} entre l'état $X_{n+1/n}^{SF}(Lat)$ de position de latitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état $X_{n+1/n}(Lat)$ de position de latitude du filtre de Kalman principal,
- [0169] - à un seuil prédéterminé pour la longitude, l'écart V_{Lon} entre l'état $X_{n+1/n}^{SF}(Lon)$ de position de longitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état $X_{n+1/n}(Lon)$ de position de longitude du filtre de Kalman principal,
- [0170] - à un seuil prédéterminé pour l'altitude, l'écart V_{Alt} entre l'état $X_{n+1/n}^{SF}(Alt)$ de position de l'altitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état $X_{n+1/n}(Alt)$ de position de l'altitude du filtre de Kalman principal, et
- [0171] pour lever une alarme dès qu'au moins un écart associé à l'une des composante latitude, longitude, altitude est supérieur au seuil prédéterminé correspondant et associé respectivement à chacune des composantes latitude, longitude, altitude.
- [0172] En complément facultatif, le dispositif est également configuré pour déterminer ledit seuil prédéterminé en fonction d'une probabilité de fausse alarme prédéterminée, en considérant par exemple, une distribution de la variable de test, correspondant à l'écart entre le filtre principal de Kalman K et le sous-filtre considéré, selon une loi gaussienne centré en zéro et d'écart-type égal à un. Le seuil de détection est par exemple choisi pour cet exemple de sorte que 1% du temps on détecte un erroné qui n'est pas présent ($P_{fa} = 0,01$)
- [0173] Ainsi, selon l'exemple précédent, les variables de test V_{Lat} , V_{Lon} et V_{Alt} suivent donc une distribution gaussienne centrée en zéro (lorsqu'il n'y a pas d'erreur) et d'écart type respectif $\sqrt{P_{\Delta}(Lat, Lat)}$, $\sqrt{P_{\Delta}(Lon, Lon)}$ et $\sqrt{P_{\Delta}(Alt, Alt)}$ avec P_{Δ} la matrice

de covariance de l'écart $X^{SF} - X$ égale, tel qu'indiqué précédemment, à l'écart des covariances P^{SF} et P , tel qu'exprimé selon les équations suivantes :

$$[0174] \quad P_{\Delta} \triangleq E \left[(X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n}) \cdot (X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n})^T \right] = E \left[X_{n+1/n}^{SF} X_{n+1/n}^{SF T} \right] - E \left[X_{n+1/n} X_{n+1/n}^T \right] = P_{n+1/n}^{SF} - P_{n+1/n}$$

[0175] Selon une probabilité de fausse alarme notée P_{fa} on cherche à établir une valeur de seuil réelle telle que :

$$[0176] \quad V_X = X_{n+1/n}^{SF} - X_{n+1/n} = K_{fa} \sqrt{E \left((X_{n+1/n} - X_{n+1/n}^{SF}) (X_{n+1/n} - X_{n+1/n}^{SF})^T \right)}$$

$$[0177] \quad = K_{fa} \sqrt{(P_{n+1/n}^{SF} - P_{n+1/n})} = K_{fa} \sqrt{(P_{\Delta})},$$

[0178] avec K_{fa} le coefficient qui permet d'avoir la probabilité de fausse alarme p_{fa} prédéterminée souhaitée, par exemple en considérant une loi gaussienne centrée en zéro et d'écart-type égal à un, pour une probabilité de fausse alarme $p_{fa}=0,01$ alors $K_{fa} = 1,96$, tandis que pour $p_{fa}=10^{-4}$ alors $K_{fa} = 3,9$.

[0179] Le seuil prédéterminé pour la latitude est alors $K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Lat, Lat)}$, de même le seuil prédéterminé pour la longitude est alors $K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Lon, Lon)}$, et enfin le seuil prédéterminé pour l'altitude est alors $K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Alt, Alt)}$.

[0180] Selon ce mode de réalisation particulier optionnel, la levée d'alarme est alors conditionnée à la présence d'au moins un écart V , associé à l'une des composante latitude, longitude, altitude, supérieur au seuil prédéterminé correspondant et associé respectivement à chacune des composantes latitude, longitude, altitude. Autrement dit, trois tests de comparaison sont effectués par le module de vérification d'intégrité 50 respectivement selon la latitude, la longitude et l'altitude et si :

$$[0181] \quad |V_{Lat}| > K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Lat, Lat)} \text{ ou}$$

$$[0182] \quad |V_{Lon}| > K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Lon, Lon)} \text{ ou}$$

$$[0183] \quad |V_{Alt}| > K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Alt, Alt)} \text{ alors un erroné est détecté et l'alarme est levée.}$$

[0184] Ici, la levée d'alarme étant effectuée au moyen de trois tests de comparaison distincts, respectivement selon la latitude, la longitude et l'altitude, ces tests n'étant pas complètement indépendants du fait de la corrélation entre ces états de positions (latitude, longitude et altitude) selon un aspect optionnel la probabilité de fausse alarme par test $p_{fa-test}$ est égale à la probabilité de fausse alarme globale p_{fa} divisée par trois (i.e. $p_{fa-test} = p_{fa}/3$). Selon un aspect complémentaire et facultatif, le dispositif D est également configuré pour déterminer un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou d'une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, ledit rayon de

protection garantissant que la valeur de la distance entre la position hybride fournie à partir dudit filtre principal de Kalman K et la position vraie dudit véhicule est inférieure à la valeur dudit rayon de protection, ledit rayon de protection étant déterminé en déterminant un rayon de protection associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman SF_1 et SF_2 respectivement, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :

- [0185] - un coefficient associé à une probabilité de fausse alarme prédéterminée,
- [0186] - la matrice de covariance de l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
- [0187] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
- [0188] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- [0189] ledit rayon de protection étant le plus grand des rayons de protection associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.
- [0190] Autrement dit, en absence d'écart supérieur audit seuil prédéterminé précédemment par le module de vérification d'intégrité 50, aucune alarme n'est levée, et le dispositif D de navigation et de positionnement met alors en œuvre la détermination d'un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites mesures de positionnement par satellites GNSS fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS ou des mesures fournies par ladite unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule.
- [0191] Pour déterminer un tel rayon de protection, qui est entièrement prédictif, à partir des covariances du filtre de Kalman principal K et des sous-filtres de Kalman SF_1 , et SF_2 , le dispositif D de navigation et de positionnement introduit une probabilité de non détection P_{nd} .
- [0192] Autrement dit, selon cet aspect complémentaire optionnel, comme visé selon des mécanismes d'intégrité dans l'aéronautique, le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention, cherche à déterminer quelle est la performance de protection de la surveillance, c'est-à-dire jusqu'où l'erreur en entrée peut amener l'erreur de position du filtre principal K de Kalman sans détection.
- [0193] L'écart entre la position 30 INS/VEH/GNSS et la position vraie est propre à être bornée de la manière suivante en prenant l'exemple de la latitude :
- [0194] $|Lat^{INS/VEH/GNSS} - Lat^{Vraie}| \leq |Lat^{INS/VEH/GNSS} - Lat^{SF}| + |Lat^{SF} - Lat^{Vraie}|$
- [0195] $|Lat^{INS/VEH/GNSS} - Lat^{Vraie}| \leq |X^{SF}(Lat) - X(Lat)| + |Lat^{SF} - Lat^{Vraie}|$
- [0196] de la même façon que précédemment, le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention borne alors $|Lat^{SF} - Lat^{Vraie}|$ avec la probabilité de non détection P_{nd} selon l'équation suivante :

$$|Lat^{SF} - Lat^{Vraie}| \leq K_{pnd} \sqrt{P^{SF}(Lat, Lat)}, \text{ avec } K_{pnd} \text{ le coefficient permettant}$$

d'assurer que la probabilité d'avoir une valeur de variable v supérieure à la valeur K_{pnd} soit égale à P_{nd} , avec v une variable qui suit une loi gaussienne centrée d'écart-type 1. K_{pnd} permettant ainsi de borner les erreurs rares et normales du sous-filtre qui emmènent la position en dehors du rayon de protection avec la probabilité P_{nd} .

- [0197] Autrement dit, pour déterminer un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou d'une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention, borne $|X^{SF}(Lat)-X(Lat)|$ lorsqu'il n'y a pas de détection, et obtient le rayon de protection PL (de l'anglais *Protection Level*) selon l'équation suivante, pour la latitude :

$$[0198] \quad |Lat^{INS/VEH/GNSS} - Lat^{Vraie}| \leq K_{fa} \sqrt{P_{\Delta}(Lat, Lat)} + K_{pnd} \sqrt{P^{SF}(Lat, Lat)} \stackrel{\text{def}}{=} PL$$

- [0199] le rayon de protection PL est prédictible (i.e. sans mesure) car ne dépendant pas du « réalisé » mais seulement de la statistique, et permet donc de faire de la prévision de mission du véhicule.

- [0200] Selon un autre aspect complémentaire et facultatif, en absence d'écart supérieur audit seuil prédéterminé précédemment par le module de vérification d'intégrité 50, aucune alarme n'est levée, et le dispositif est également configuré pour déterminer un rayon d'incertitude, ledit rayon d'incertitude étant déterminé en déterminant un rayon d'incertitude associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :

- [0201] - l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,

- [0202] - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée

- [0203] - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,

- [0204] ledit rayon d'incertitude étant le plus grand des rayons d'incertitude associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.

- [0205] De manière, similaire à ce qui a été indiqué précédemment en relation avec la détermination du rayon de protection, selon cet aspect complémentaire facultatif, le dispositif D de navigation et de positionnement selon la présente invention, borne l'erreur avec le rayon d'incertitude UL (de l'anglais *Uncertainty Level*) selon l'équation suivante, pour la latitude :

$$[0206] \quad |Lat^{INS/VEH/GNSS} - Lat^{Vraie}| \leq |X^{SF}(Lat)-X(Lat)| + K_{pnd} \sqrt{P^{SF}(Lat, Lat)} \stackrel{\text{def}}{=} UL$$

- [0207] En se référant aux usages de l'aéronautique, les rayons de protection PL sont calculés

sur l'horizontal (HPL pour *horizontal protection level*) et sur la verticale (VPL pour *vertical protection level*). Pour un aéronef, ils sont notamment utilisés pour savoir si on peut commencer une procédure d'atterrissage par exemple (et le cas échéant éviter les montagnes autour de l'aéronef lors de l'atterrissage). En cas de détection d'un erroné, l'aéronef utilise alors plutôt les rayons d'incertitude horizontaux HUL (HUL pour *H horizontal Uncertainty Level*) et verticaux VUL (VUL pour *Vertical Uncertainty Level*) pour continuer à borner l'erreur.

[0208] On applique les calculs précédents de rayon de protection PL et d'incertitude UL appliqués précédemment à la latitude, à l'altitude cette fois pour obtenir respectivement le rayon de protection vertical VPL et le rayon d'incertitude vertical VUL.

[0209] Pour obtenir le rayon de protection horizontal HPL et le rayon d'incertitude horizontal HUL, un espace bidimensionnel (2D) correspondant au plan horizontal local est utilisé de sorte que :

[0210] $\| Pos_H^{INS/VEH/GNSS} - Pos_H^{Vraie} \| \leq \| Pos_H^{\frac{INS}{VEH}} - Pos_H^{SF} \| + \| Pos_H^{SF} - Pos_H^{Vraie} \|$
avec avec Pos_H , la position dans le plan horizontal local, puis $\| Pos_H^{SF} - Pos_H^{Vraie} \|$ est borné de la façon suivante, par le dispositif D selon la présente invention :

[0211] $\| Pos_H^{SF} - Pos_H^{Vraie} \| \leq K'_{pnd} \sqrt{\maxvap(P_H^{SF})}$

[0212] avec P_H^{SF} une matrice 2x2 correspondant à la projection de la matrice P^{SF} sur les composantes de position horizontale, et $\maxvap()$ l'opérateur qui donne la plus grande valeur propre d'une matrice 2x2:

[0213]
$$\maxvap(P_H^{SF}) = \frac{P_H^{SF}(1,1) + P_H^{SF}(2,2)}{2} + \sqrt{\left(\frac{P_H^{SF}(1,1) - P_H^{SF}(2,2)}{2} \right)^2 + P_H^{SF}(1,2)^2}$$

[0214] K'_{pnd} le coefficient tel que la probabilité d'avoir la valeur d'une variable v , supérieure à K'_{pnd}^2 soit égale à P_{nd} , avec v une variable qui suit une loi du χ^2 (loi prononcée usuellement « khi carré » ou « khi-deux ») d'ordre 2.

[0215] Il est à noter que dans ce cas particulier lié à une application aéronautique, la latitude et la longitude ne sont plus considérée de manière indépendante, et que dans ce cas le seuil prédéterminé utilisé par le module de vérification d'intégrité 50 pour détecter un erroné et lever une alarme correspond à l'écart de position dans le plan horizontal, autrement dit à la norme de l'écart en 2D, tel que :

$\| Pos_H^{INS/VEH/GNSS} - Pos_H^{SF} \| \leq K'_{fa} \sqrt{\maxvap(P_H^\Delta)}$ avec P_H^Δ la matrice 2x2 qui

est la projection de la matrice P_Δ la matrice de covariance de l'écart $X^{SF} - X$ sur les composantes de position horizontale, et avec K'_{fa} le coefficient tel que la probabilité d'avoir la valeur d'une variable v , supérieure à K'_{fa}^2 soit égale à P_{fa} , avec v une

variable qui suit une loi du χ^2 (loi prononcée usuellement « khi carré » ou « khi-deux ») d'ordre 2, si bien que :

$$[0216] \quad HUL = \| Pos_H^{INS/VEH/GNSS} - Pos_H^{SF} \| + K'_{pnd} \sqrt{\maxvap(P_H^{SF})}$$

$$[0217] \quad HPL = K'_{fa} \sqrt{\maxvap(P_H^A)} + K'_{pnd} \sqrt{\maxvap(P_H^{SF})}$$

[0218] le rayon de protection (respectivement d'incertitude) final est le plus grand des rayons de protection (respectivement d'incertitude) associés aux sous-filtres SF₁ et SF₂.

[0219] Il est à noter que le troisième sous-filtre SF₃ troisième sous-filtre de Kalman SF₃ configuré pour calculer des corrections 44 INS de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle ne correspond pas à une hypothèse de panne mais est uniquement destiné à servir à une reconfiguration optionnelle comme décrit par la suite, le troisième sous-filtre SF₃ n'est donc pas pris en compte pour les déterminations de rayon de protection et d'incertitude précités où seuls les premier et deuxième sous-filtres SF₁ et SF₂ associés respectivement aux solutions INS/GNSS et INS/VEH interviennent.

[0220] Ainsi, sur la vue 70 de l'exemple de la [Fig.4] d'une situation où le filtre de Kalman principal est corrompu, la position vraie 72 d'un véhicule, dans lequel le dispositif D selon la présente invention est embarqué, est représentée.

[0221] La position 74 INS/VEH obtenue via le sous-filtre SF₂ de la figure 2 est saine et représentée dans un cercle 76 de rayon 78 dont la valeur est égale à

$$K'_{pnd} \sqrt{\maxvap(P_H^{SF})}.$$

[0222] La position 80 du filtre principal de Kalman K associé à la solution hybride INS/VEH/GNSS est corrompue, du fait d'un erroné GNSS. Plus précisément, la projection 2D 82 de la matrice de covariance du filtre principal de Kalman K ne représente plus l'erreur de la position INS/VEH/GNSS. Par contre, comme le sous-filtre SF₂ associé à la solution INS/VEH n'utilise pas la mesure GNSS, la position 74 INS/VEH est saine. C'est-à-dire que l'erreur de position suit bien une loi gaussienne centrée en 0 et de matrice de covariance P^{SF}.

[0223] Selon un autre aspect optionnel facultatif, en cas de levée d'alarme, le filtre de Kalman principal K, le premier sous-filtre de Kalman SF₁ et le deuxième sous-filtre de Kalman SF₂ sont également propres à se reconfigurer sur le troisième sous-filtre de Kalman SF₃ configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle.

[0224] Autrement dit, le troisième sous-filtre de Kalman SF₃ configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle est utile pour la reconfiguration des autres solutions de po-

sitionnement en cas de levée d'alarme associée à la détection d'un erroné dû à une perte d'intégrité desdites données fournies par ladite unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou desdites données fournies par ledit récepteur 16 de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS.

- [0225] Plus précisément, le filtre de Kalman principal K, le premier sous-filtre de Kalman SF₁ et le deuxième sous-filtre de Kalman SF₂ se reconfigurent chacun en remplaçant (i.e. en écrasant) leur propre état et leur propre matrice de covariance respectivement par l'état et la matrice de covariance du troisième sous-filtre de Kalman SF₃. Il est à noter que lorsque la précision de l'unité de mesure inertielle est inférieure à un seuil de précision prédéterminé, l'utilisateur du véhicule est propre à faire en sus un recalage manuel de la position, car il est apte à savoir où il est et si effectivement on ne peut plus faire confiance ni à GNSS ni à VEH
- [0226] Autrement dit, au moment de la reconfiguration, le cas échéant après le recalage manuel de position sur le sous-filtre de Kalman SF₃ associé à la solution INS, la reconfiguration se fait donc de la manière suivante :
- [0227] $X_{n+1/n} = X_{n+1/n}^{SF-INS}$ et $P_{n+1/n} = P_{n+1/n}^{SF-INS}$ pour le filtre principal de Kalman K,
- [0228] $X_{n+1/n}^{SF} = X_{n+1/n}^{SF-INS}$ et $P_{n+1/n}^{SF} = P_{n+1/n}^{SF-INS}$ pour tous les sous-filtres SF₁ et SF₂,
- [0229] avec $X_{n+1/n}^{SF-INS}$ et $P_{n+1/n}^{SF-INS}$ l'état et la matrice de covariance du sous-filtre de Kalman SF₃ associé à la solution INS.
- [0230] Il n'est pas évident de savoir quelle est la mesure qui est erronée parmi VEH et GNSS, car le module 50 de vérification d'intégrité est propre à déterminer que le filtre de Kalman principal K est corrompu mais pas à déterminer lequel des sous-filtres SF₁ et SF₂ ne l'est pas. En effet, même si un seul des sous-filtres SF₁ et SF₂ a un test qui dépasse le seuil prédéterminé associé, c'est peut-être l'autre sous-filtre qui est corrompu.
- [0231] En revanche, le troisième sous-filtre de Kalman SF₃ associé à la solution INS ne peut être corrompu par une panne VEH ou GNSS. Il est donc sain.
- [0232] Il est à noter que même si les mesures VEH ou GNSS sont corrompues sur une période de temps courte, la corruption du ou des sous-filtres SF₁ ou SF₂ peut durer longtemps et impacter tous leurs états pendant cette durée.
- [0233] Par ailleurs, la reconfiguration mise en œuvre automatiquement par le dispositif D selon la présente invention permet d'éviter de redémarrer entièrement l'unité de mesure inertielle ou le filtre de Kalman principal et les sous-filtres de Kalman SF₁, SF₂ et SF₃ et de refaire l'alignement de l'unité de mesure inertielle 12. Selon un aspect facultatif optionnel non représenté, le dispositif comprend en outre un module d'initialisation de la position dudit véhicule configuré pour initialiser la position dudit véhicule en utilisant au moins un des éléments appartenant au groupe comprenant au

moins :

- [0234] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS,
- [0235] - une mesure de positionnement consolidée à partir de plusieurs sources GNSS distinctes, par exemple (Galileo versus GPS ou mono-fréquence L1 versus mono-fréquence L5, etc....) pour se prémunir des multi-trajets et des interférents GNSS simples par exemple,
- [0236] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif,
- [0237] - une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0238] - une mesure de positionnement fournie par une source GNSS consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- [0239] - une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif
- [0240] En effet, l'unité 18 de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule ne fournit pas d'informations sur la position absolue en latitude, longitude et altitude) mais seulement des informations de déplacement, et les sous-filtres de Kalman SF₂ et SF₃ sans source de position absolue, respectivement associés aux solution INS/VEH et INS, doivent donc être initialisés avec une position en utilisant au moins un des éléments appartenant au groupe susmentionné.
- [0241] Selon un aspect particulier, le dispositif D selon la présente invention lorsqu'il met en œuvre la consolidation d'une position initiale GNSS ou saisie manuellement au moyen d'une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif D, notamment en cas d'immobilisation du véhicule dans lequel il est embarqué (i.e. ladite extinction correspond à une mise hors tension dudit dispositif D notamment en cas d'arrêt et mise hors tension dudit véhicule), permet s'il y a une différence alors que le véhicule n'a pas bougé, d'informer l'utilisateur, via l'émission par ledit dispositif D d'un signal prédéterminé, de l'incohérence qui sera alors propre à décider si la position initiale est correcte ou non.
- [0242] L'homme du métier comprendra que l'invention ne se limite pas aux modes de réalisation décrits, ni aux exemples particuliers de la description, les modes de réalisation et les variantes mentionnées ci-dessus étant propres à être combinés entre eux pour générer de nouveaux modes de réalisation de l'invention.
- [0243] La présente invention propose ainsi une architecture particulière du dispositif de navigation et de positionnement permettant de détecter les vulnérabilités des mesures GNSS et/ou VEH précitées, afin de maintenir en quasi-permanence, voire permanence, l'intégrité de la localisation associée.
- [0244] Un tel contrôle ne s'effectue pas que sur un satellite unique à la fois ce qui permet d'éviter de limiter le domaine applicatif.

- [0245] De plus, le dispositif D de navigation et de positionnement est selon un aspect optionnel propre à proposer en permanence un ensemble de solutions de navigation dont une partie n'utilise pas les mesures GNSS et/ou VEH depuis un certain temps, typiquement de plusieurs heures à plusieurs jours.
- [0246] En outre, selon une variante optionnelle de réalisation, le dispositif D de navigation et de positionnement est aussi capable de fournir un rayon de protection contre une vulnérabilité des mesures GNSS et/ou VEH et propre à déclencher une reconfiguration du filtre de Kalman principal K sur une solution d'un sous-filtre de Kalman sain si une vulnérabilité des mesures GNSS et/ou VEH est détectée. Ainsi, une solution de repli saine est en permanence disponible en cas de détection d'un problème sur les signaux GNSS et/ou VEH.
- [0247] Ainsi pour résumer, la présente invention permet de maintenir l'intégrité de la localisation, d'avertir lorsque les signaux GNSS et/ou VEH ne sont pas fiables, de se reconfigurer sur une solution non entachée par la vulnérabilité des mesures GNSS et/ou VEH, autrement dit, de venir reconfigurer le filtre de Kalman principal K sur un sous-filtre de Kalman « sain », et d'avoir à disposition un panel de solutions de navigation déduites de sous-filtres de Kalman ayant navigué sans la mesure GNSS et/ou sans la mesure VEH depuis un temps variable.

Revendications

[Revendication 1]

Dispositif (D) de navigation et de positionnement, propre à être embarqué à bord d'un véhicule propre à se déplacer entre deux positions géographiques, le dispositif comprenant au moins :

- une unité (12) de mesure inertielle propre à fournir des mesures de navigation,
- un récepteur (16) de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS,
- une unité (18) de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,
- un filtre de Kalman principal (K) en boucle fermée configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies, en entrée dudit filtre de Kalman principal, à la fois par :

- ladite unité de mesure inertielle,
- ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, et
- ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,

le dispositif étant **caractérisé en ce qu'il** comprend en outre en sortie dudit filtre de Kalman principal au moins deux sous-filtres de Kalman distincts comprenant :

- un premier sous-filtre de Kalman (SF_1) configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle et par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS,
 - un deuxième sous-filtre de Kalman (SF_2) configuré pour calculer des corrections de données de navigation par hybridation de données fournies par l'unité de mesure inertielle et par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule,
- chaque sous-filtre de Kalman étant propre à :
- appliquer la correction hybride fournie, en entrée à chaque cycle, par le filtre de Kalman principal lors de sa phase de propagation, et
 - déterminer un positionnement dudit véhicule associé audit sous-filtre de Kalman considéré en appliquant la correction calculée par ledit sous-filtre de Kalman au positionnement hybride obtenu à partir dudit filtre de Kalman principal.

[Revendication 2]

Dispositif selon la revendication 1, dans lequel le dispositif comprend également un module (50) de vérification d'intégrité configuré pour :

- contrôler, à chaque cycle, l'intégrité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou

l'intégrité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, en comparant, à un seuil prédéterminé, l'écart entre l'état de chaque sous-filtre de Kalman et l'état du filtre de Kalman principal,

- en cas d'écart supérieur audit seuil prédéterminé, lever une alarme propre à signaler une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS.

[Revendication 3]

Dispositif selon la revendication 2, dans lequel le dispositif est configuré pour comparer :

- à un seuil prédéterminé pour la latitude, l'écart entre l'état de position de latitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de latitude du filtre de Kalman principal,

- à un seuil prédéterminé pour la longitude, l'écart entre l'état de position de longitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de longitude du filtre de Kalman principal,

- à un seuil prédéterminé pour l'altitude l'écart entre l'état de position de l'altitude de chaque sous-filtre de Kalman et l'état de position de l'altitude, du filtre de Kalman principal, et pour lever une alarme dès qu'au moins un écart associé à l'une des composantes latitude, longitude, altitude est supérieur au seuil prédéterminé correspondant et associé respectivement à chacune des composantes latitude, longitude, altitude.

[Revendication 4]

Dispositif selon la revendication 2 ou 3, dans lequel le dispositif est également configuré pour déterminer ledit seuil prédéterminé en fonction d'une probabilité de fausse alarme prédéterminée.

[Revendication 5]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, dans lequel, le dispositif comprend en outre en sortie dudit filtre de Kalman un troisième sous-filtre de Kalman (SF_3) configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle, et en cas de levée d'alarme, le filtre de Kalman principal, le premier sous-filtre de Kalman et le deuxième sous-filtre de Kalman sont également propres à se re-configurer sur le troisième sous-filtre de Kalman configuré pour calculer des corrections de données de navigation à partir des données fournies uniquement par l'unité de mesure inertielle.

[Revendication 6]

Dispositif selon la revendication 5, dans lequel le filtre de Kalman

principal, le premier sous-filtre de Kalman et le deuxième sous-filtre de Kalman se reconfigurent chacun en remplaçant leur propre état et leur propre matrice de covariance respectivement par l'état et la matrice de covariance du troisième sous-filtre de Kalman.

[Revendication 7]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le dispositif est également configuré pour déterminer un rayon de protection vis-à-vis d'une vulnérabilité desdites données fournies par ladite unité de modélisation de déplacement(s) dudit véhicule, et/ou d'une vulnérabilité desdites données fournies par ledit récepteur de mesures de positionnement par satellite(s) GNSS, ledit rayon de protection garantissant que la valeur de la distance entre la position hybride fournie à partir dudit filtre principal de Kalman et la position vraie dudit véhicule est inférieure à la valeur dudit rayon de protection, ledit rayon de protection étant déterminé en déterminant un rayon de protection associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :

- un coefficient associé à une probabilité de fausse alarme prédéterminée,
 - la matrice de covariance de l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
 - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
 - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- ledit rayon de protection étant le plus grand des rayons de protection associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.

[Revendication 8]

Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le dispositif est également configuré pour déterminer un rayon d'incertitude, ledit rayon d'incertitude étant déterminé en déterminant un rayon d'incertitude associé à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman, en utilisant, pour chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman :

- l'écart entre l'état dudit sous-filtre de Kalman considéré et l'état du filtre de Kalman principal,
 - un coefficient associé à une probabilité de non détection prédéterminée
 - la matrice de covariance de chaque sous-filtre de Kalman,
- ledit rayon d'incertitude étant le plus grand des rayons d'incertitude associés à chacun des premier et deuxième sous-filtres de Kalman.

[Revendication 9]

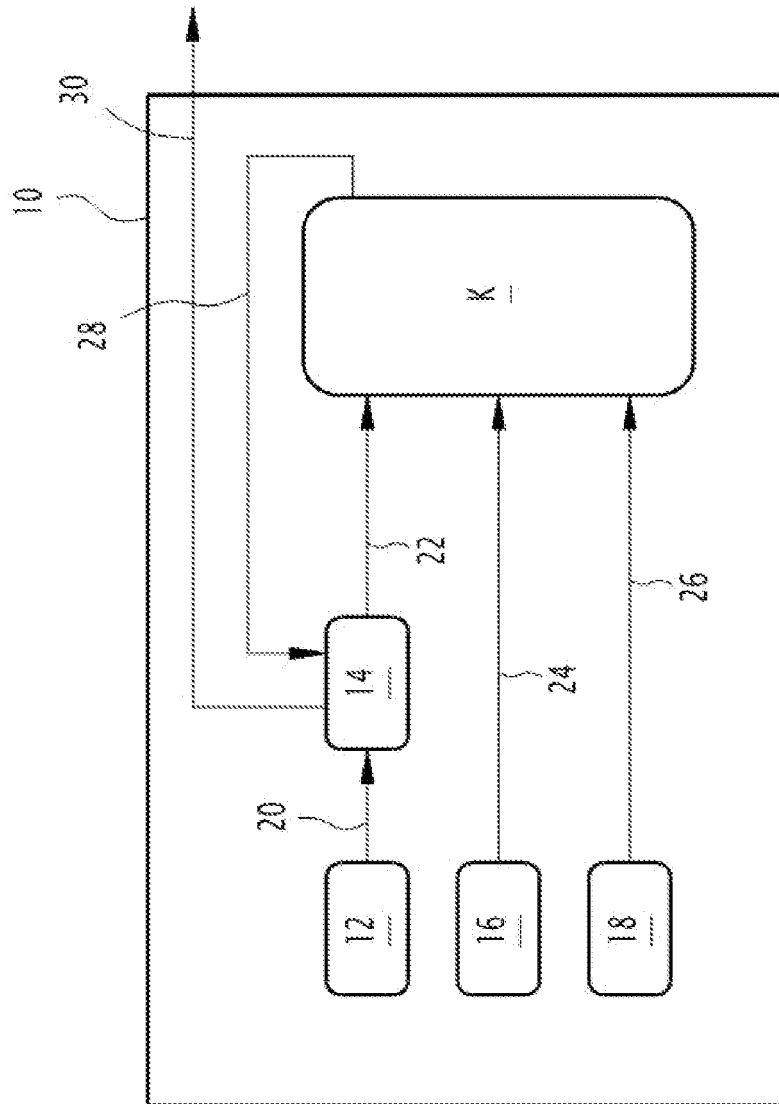
Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans

lequel le dispositif comprend en outre un module d'initialisation de la position dudit véhicule configuré pour initialiser la position dudit véhicule en utilisant au moins un des éléments appartenant au groupe comprenant au moins :

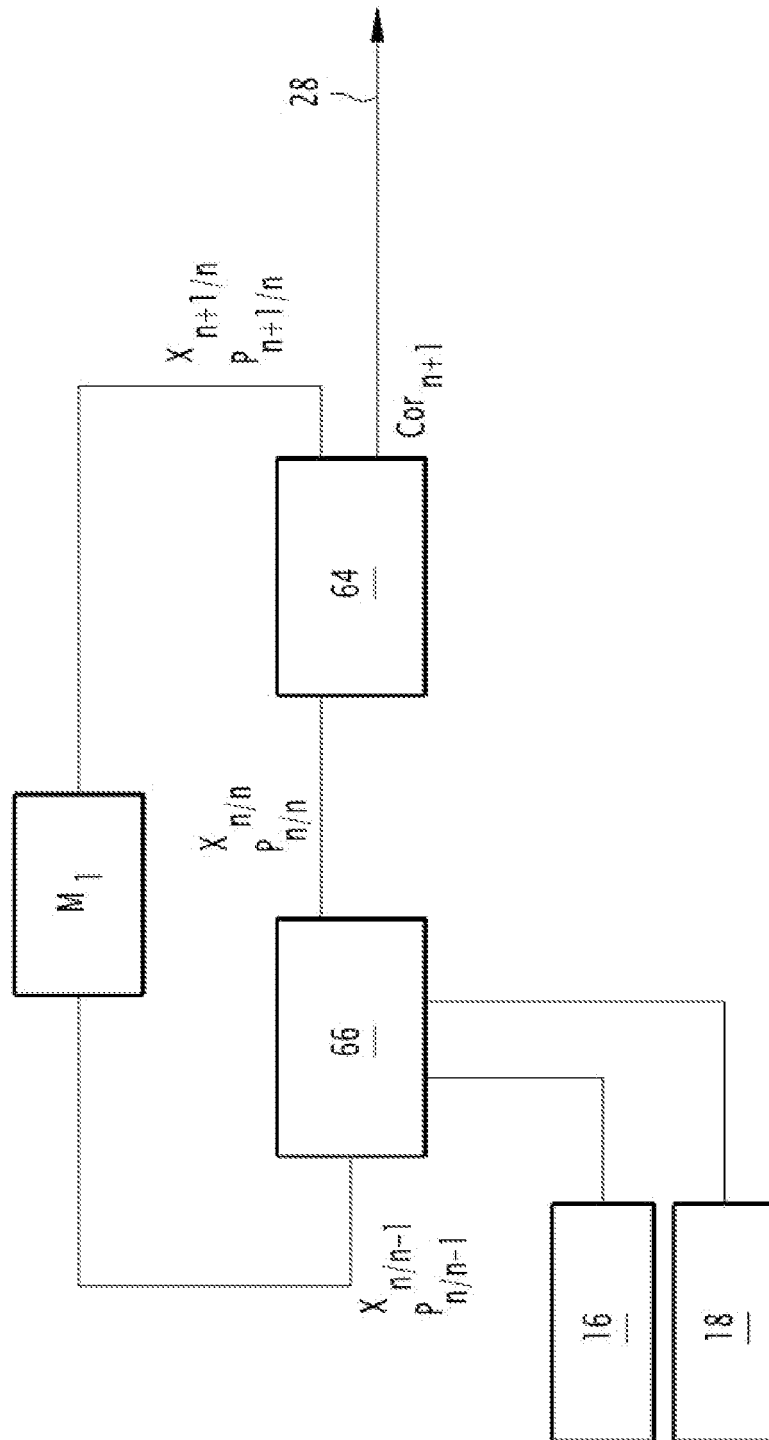
- une mesure de positionnement fournie par une source GNSS,
- une mesure de positionnement consolidée à partir de plusieurs sources GNSS distinctes,
- une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif,
- une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- une mesure de positionnement fournie par une source GNSS consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif,
- une position saisie manuellement via une interface de saisie dudit dispositif consolidée par une position mémorisée au préalable à l'extinction précédente dudit dispositif.

[Revendication 10] Véhicule propre à se déplacer entre deux positions géographiques, ledit véhicule étant caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif (D) de navigation et de positionnement selon l'une quelconque des revendications précédentes.

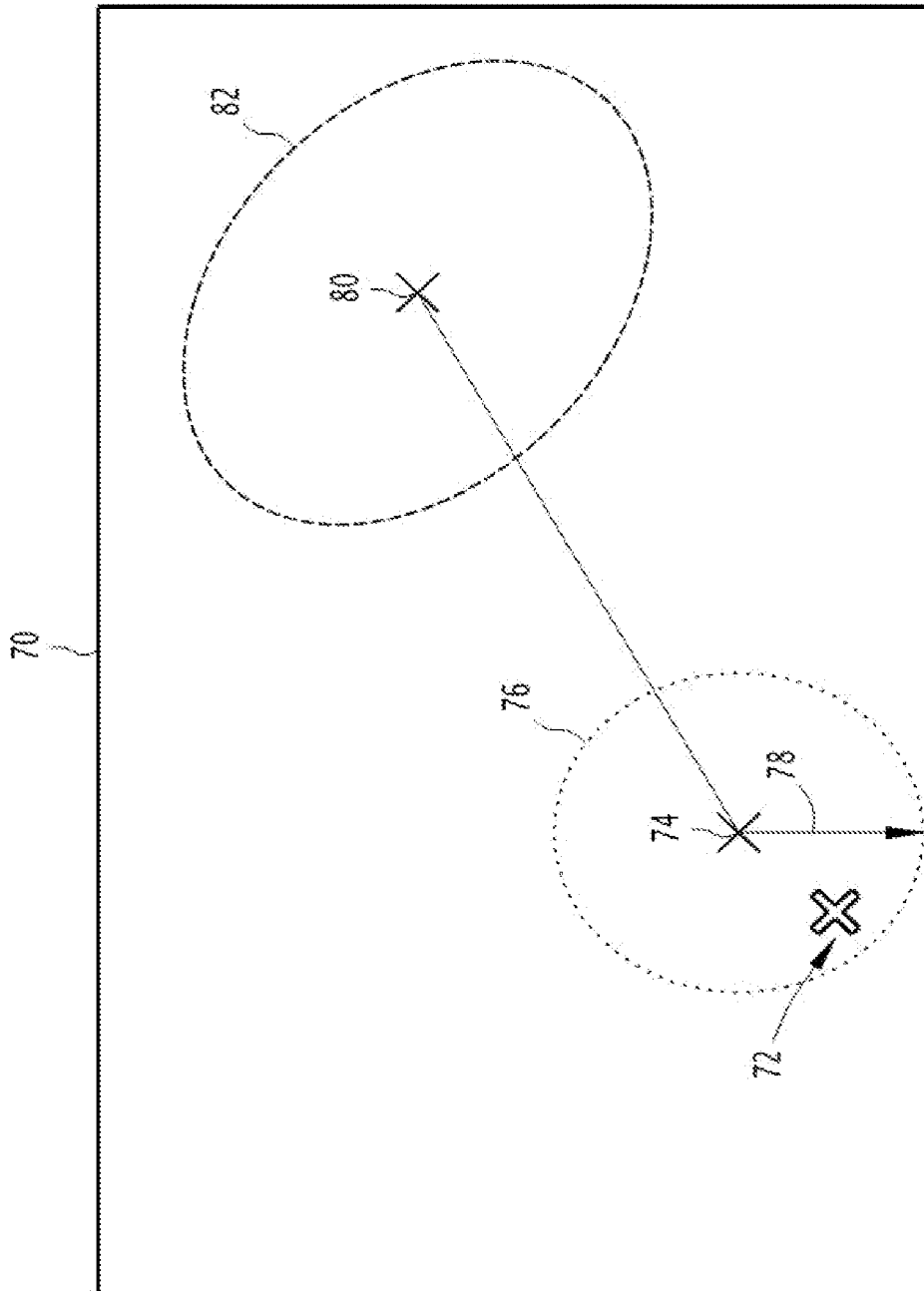
[Fig. 1]



[Fig. 3]



[Fig. 4]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

EP 3 901 650 A1 (HONEYWELL INT INC [US])
27 octobre 2021 (2021-10-27)

ZHENZHEN MAI ET AL: "Mobile target localization and tracking techniques in harsh environment utilizing adaptive multi-modal data fusion",
IET COMMUNICATIONS, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, GB,
vol. 15, no. 5,
3 février 2021 (2021-02-03), pages 736-747, XP006105783,
ISSN: 1751-8628, DOI: 10.1049/CMU2.12116

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT