

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :

3 137 450

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national :

22 06514

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 M 3/26 (2022.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 29.06.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 05.01.24 Bulletin 24/01.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été
établi à la date de publication de la demande.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : TORUS ACTIONS Société par actions
simplifiée — FR.

⑦2 Inventeur(s) : HOANG Hong Son, NGUYEN Tien
Dung, OLIVIE Matthieu, BARAILLE Rémy et PROTIN
Frédéric.

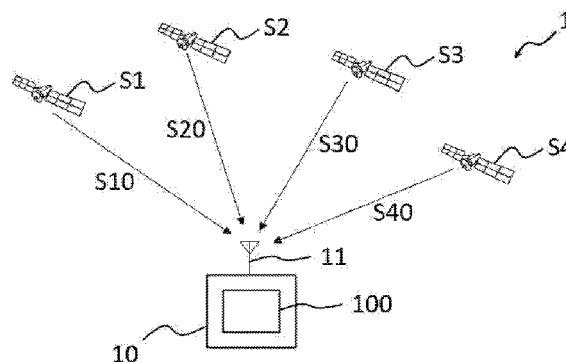
⑦3 Titulaire(s) : TORUS ACTIONS Société par actions
simplifiée.

⑦4 Mandataire(s) : ARGYMA.

⑤4 Procédé de détermination de la position d'un dispositif à partir d'un réseau de satellites dans un système
prédicatif.

⑤7 L'invention concerne un procédé de mesure de la po-
sition d'un dispositif à partir d'un réseau de satellites dans
un système prédictif à filtre de gain K variable, ledit gain K
étant représenté par un vecteur de coefficients de gain va-
riables, ledit procédé, mis en œuvre par le dispositif, com-
prenant notamment à chaque itération suivant un instant t
les étapes de minimisation de l'espérance du carré de l'in-
novation du filtre à l'instant t+1, l'innovation étant calculée à
partir des coefficients du gain, afin d'améliorer la précision
du positionnement.

Figure pour l'abrégé : Figure 1



FR 3 137 450 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé de détermination de la position d'un dispositif à partir d'un réseau de satellites dans un système prédictif

Domaine technique

[0001] La présente invention se rapporte au domaine du positionnement par satellite et concerne plus particulièrement un procédé et un dispositif de géolocalisation.

Technique antérieure

[0002] Au fil des années, les techniques de positionnement et de navigation ont été révolutionnées grâce aux systèmes mondiaux de navigation par satellite (Global Navigation Satellite Systems ou GNSS). Aujourd'hui, le positionnement et la navigation par satellite sont des outils importants pour la sécurité, notamment la sécurité maritime, les systèmes de guidage balistique ou le suivi de véhicules et de personnels. Notamment, diverses phases de vol, circulation des navires, en route, en approche ou à l'atterrissage sont réalisées par positionnement par satellite étant donné que les systèmes mondiaux de navigation par satellite ont une couverture planétaire et ne nécessitent pas d'aide à la navigation au sol, ce qui permet une planification d'itinéraire optimale, un espace aérien et océanique amélioré et une réduction des coûts opérationnels.

[0003] La principale préoccupation dans les applications utilisant le positionnement par satellite concerne la fiabilité et la continuité. Les algorithmes de positionnement par satellite sont maintenant conçus et évalués à l'aide d'une métrique de performance importante appelée intégrité pour prévenir ses dysfonctionnements et assurer sa fiabilité - gage de confiance placée dans un système. Ceci est réalisé en émettant des alertes lorsque l'utilisation du système de positionnement par satellite n'est pas sûre.

[0004] Dans ces systèmes mondiaux de navigation par satellite, les satellites émettent des signaux permettant aux récepteurs de calculer leur position. Ces signaux sont obtenus par modulation de phase d'une porteuse avec des messages codés et sont disponibles sur plusieurs fréquences. Le récepteur, par exemple présent dans un smartphone ou un système de localisation embarqué dans un véhicule, comprend une puce à faible coût qui permet la réception d'une seule fréquence et assure le positionnement sur les mesures de code uniquement, sans inclure d'algorithme de mesure de correction.

[0005] Cette méthode de positionnement permet d'obtenir une précision de la commande de l'ordre de cinq mètres dans les zones ouvertes. En incluant un algorithme de correction de mesure par exemple basé sur un filtre de Kalman, il est possible d'obtenir une précision de l'ordre du mètre. Cependant, cette précision est insuffisante pour certaines applications qui nécessitent une précision centimétrique telles que, par exemple, les véhicules autonomes et semi-autonomes, quel que soit l'environnement (autoroute,

urbain, etc.) dans lequel ils opèrent.

- [0006] L'obtention d'une précision centimétrique de la géolocalisation s'avère compliquée lorsque le signal est perturbé, notamment en milieu urbain avec la présence d'obstacles qui peuvent bloquer ou réfléchir les signaux provenant des satellites. Cette précision, déjà obtenue en milieu ouvert grâce à l'utilisation d'un filtre fusionnant, peut être obtenue en zone urbaine en combinant les mesures obtenues à l'aide des signaux satellites avec des données de plusieurs capteurs et avec un choix de filtre approprié associé à un modèle dynamique. Cependant, de tels systèmes multi-capteurs sont complexes et onéreux.
- [0007] Dans ce contexte, il est essentiel de concevoir le meilleur algorithme de filtrage possible pour le positionnement GNSS du véhicule.
- [0008] Jusqu'à présent, l'algorithme de positionnement par satellite basé sur le filtre de Kalman étendu est reconnu comme l'outil le plus puissant et le plus largement utilisé pour le traitement des signaux satellites afin d'assurer une estimation de position fiable. La raison en est que le filtre de Kalman est récursif dans le temps et prend en compte la contribution de toutes les mesures de manière optimale, en ne traitant que les mesures actuelles sans avoir besoin de mémoriser toutes les données passées. Notamment, pour les systèmes d'entrée-sortie linéaires, le filtre de Kalman est le meilleur estimateur linéaire au sens de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) à condition que les covariances de processus et de mesure soient connues exactement.
- [0009] La difficulté d'avoir des statistiques précises est un obstacle important et pratiquement insurmontable pour garantir un positionnement précis du véhicule par le filtre de Kalman. Il existe de nombreuses tentatives pour surmonter cette difficulté et la plupart d'entre elles sont basées sur l'estimation en ligne des matrices de covariance pour améliorer les performances du filtre de Kalman qui est alors dit « adaptatif » (AKF).
- [0010] Il existe donc un besoin d'une solution permettant de remédier au moins en partie à ces inconvénients.

Exposé de l'invention

- [0011] Un des buts de l'invention est de proposer une solution simple, efficace et précise de géolocalisation. Un autre but de l'invention est de proposer une solution alternative de filtre adapté à la géolocalisation. Un autre but de l'invention est de proposer une solution technique permettant d'améliorer la précision de la géolocalisation par rapport à une solution utilisant un filtre de Kalman, notamment en présence d'obstacles qui rendent le traitement non linéaire. Un autre but de l'invention est de proposer une solution de détection précoce de la dégradation de la qualité des signaux de géoloca-

lisation.

- [0012] A cette fin, l'invention a tout d'abord pour objet un procédé de mesure de la position géographique d'un dispositif à partir d'un réseau de satellites dans un système de prévision (i.e. prédictif) à filtre de gain variable, ledit gain étant représenté par un vecteur de coefficients de gain variables, ledit procédé, mis en œuvre par le dispositif, comprenant, pour une itération à un instant $t+1$, les étapes de :
- [0013] - réception de signaux émis par une pluralité de satellites du réseau de satellites,
- [0014] - détermination de la position et/ou de la vitesse du dispositif à un instant $(t+1)$ à partir des signaux reçus, appelée « observation à l'instant $(t+1)$ »,
- [0015] - calcul de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant t et d'un modèle représentatif du système entre l'instant t et l'instant $(t+1)$,
- [0016] - calcul de la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$ comme étant le produit d'une matrice d'observation prédéterminée et de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée,
- [0017] - calcul de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ comme étant la différence entre l'observation à l'instant $(t+1)$ et la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$,
- [0018] - détermination du vecteur de coefficients du gain à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée à l'étape précédente,
- [0019] - calcul du gain à l'instant $(t+1)$ en faisant une correction par approximation stochastique par moyennage des coefficients de gain du vecteur de coefficients du gain déterminé,
- [0020] - calcul de l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ comme étant la somme de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée et du produit du gain à l'instant $(t+1)$ par l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée,
- [0021] - détermination de la position du dispositif à partir de l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée.
- [0022] Le procédé selon l'invention permet une précision de géolocalisation importante grâce à l'utilisation d'un filtre adaptatif stable. La minimisation de l'espérance du carré de l'innovation du filtre à l'instant $t+1$ calculée à partir des paramètres du gain correspond à la minimisation de l'espérance mathématique du carré de la distance entre l'observation à l'instant t et sa prédiction calculée, ce qui rend les calculs simples et nécessitant donc moins de puissance de calcul que pour un filtre de Kalman. Le vecteur de coefficients de gain est un vecteur de paramètres à définir à chaque étape (paramètres de contrôle) dans le gain du filtre. Sous une condition dite d'ergodicité, la minimisation de l'espérance mathématique du carré de la norme de l'innovation du filtre dans l'espace des probabilités est équivalente à la minimisation de la moyenne

temporelle du carré de la norme de l'innovation du filtre. Cela permet de déduire l'équation de récurrence pour calculer les paramètres du contrôle dans le gain. Ainsi, avantageusement, le problème de minimisation d'origine peut être remplacé par la minimisation en moyenne temporelle, ce qui n'est pas le cas dans un filtre de Kalman. Le procédé selon l'invention ne nécessite pas de spécification de statistiques d'entrée de variables aléatoires (en particulier, l'erreur du modèle, l'erreur d'observation, ...). Le procédé selon l'invention s'approche du régime optimal au fur que le processus de filtrage progresse. En outre, le moyennage du gain dans le temps permet un lissage qui stabilise le filtre et donc réduit l'erreur. Le filtre de Kalman est théoriquement optimal uniquement lorsque les statistiques des erreurs de mesure et de modèle sont connues avec précision exacte et que, de plus, le modèle est linéaire, ce qui est rarement le cas en pratique. Le procédé selon l'invention n'est pas contraint par cette restriction, l'utilisation de l'AF permet ainsi une géolocalisation très précise, notamment en présence d'obstacles autour du dispositif qui font perdre la connaissance des statistiques d'erreur et rendraient le filtrage de Kalman non linéaire. En pratique, la majorité des systèmes dynamiques et d'observation sont non linéaires. Le filtre de Kalman n'est optimal que pour les problèmes de filtrage linéaire. Le filtre de Kalman étendu (EKF), extension du KF pour les systèmes non linéaires, n'est pas optimal. Du fait de la minimisation itérative temporelle de l'espérance mathématique du carré de la norme de l'innovation, le procédé selon l'invention ne nécessite pas de linéarisation pour les systèmes non linéaires, il conserve une optimalité des filtres non linéaires. Pour les grandes erreurs de modèle et d'observation, les écarts importants entre les statistiques introduites et les statistiques réelles conduisent à une spécification de gain plus mauvaise dans le filtre de Kalman. Par conséquent, les erreurs d'estimation, voire les divergences, peuvent devenir importantes avec un filtre de Kalman. Le procédé selon l'invention apprend les incertitudes du modèle et les statistiques d'erreur d'observation grâce à des réalisations d'innovation du filtre et est capable de maintenir les erreurs d'estimation à un niveau faible, synonyme de robustesse. Le filtre utilisé dans le procédé selon l'invention est stable, notamment car il n'est pas contraint par la solution des équations de Riccati pour les matrices de covariance d'erreur comme cela est le cas avec un filtre de Kalman. Le procédé selon l'invention constitue un procédé à la fois simple et efficace pour le positionnement par satellite, sous de faibles conditions de la connaissance des statistiques de bruit. Le procédé selon l'invention permet notamment une estimation plus précise dans le cadre du positionnement par satellites, avec une charge de calcul et une exigence de stockage limitées.

[0023] De préférence, le procédé comprend en outre, à chaque itération, une étape de bornage des coefficients de gain variables entre un minimum et un maximum afin d'améliorer le lissage tout en étant plus simple qu'une solution évidente utilisant un

Hessien.

- [0024] De préférence encore, les coefficients du gain sont bornés entre une valeur minimale égale à une variable de bornage ϵ (petite et positive) et une valeur maximale égale à $(2 - \epsilon)$.
- [0025] Dans une forme de réalisation, les calculs, notamment sur les coefficients de gain, sont réalisés par un réseau de neurones à partir d'un échantillon prédéterminé.
- [0026] Avantagement, le modèle représentatif du système est dépourvu du paramètre « accélération », qui est considéré comme un forçage, c'est-à-dire qu'elle est traitée mathématiquement. Cela permet d'optimiser la taille du modèle, donc de réduire le nombre de traitements et donc d'erreurs, augmentant ainsi la précision des prédictions et donc de la localisation.
- [0027] L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur remarquable en ce qu'il comporte un ensemble d'instructions de code de programme qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ou plusieurs processeurs, configurent le ou les processeurs pour mettre en œuvre un procédé tel que présenté précédemment.
- [0028] L'invention concerne également un module de mesure de la position géographique d'un dispositif à partir d'un réseau de satellites dans un système prédictif à filtre de gain variable, ledit gain étant représenté par un vecteur de paramètres variables, ledit module, embarqué dans ledit dispositif, étant configuré pour :
 - [0029] - recevoir des signaux émis par une pluralité de satellites du réseau de satellites,
 - [0030] - déterminer la position et/ou de la vitesse du dispositif à un instant $(t+1)$ à partir des signaux reçus, appelée « observation à l'instant $(t+1)$ »,
 - [0031] - calculer la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant (t) et d'un modèle représentatif du système entre l'instant (t) et l'instant $(t+1)$,
 - [0032] - calculer la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$ comme étant le produit d'une matrice d'observation prédéterminée et de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée,
 - [0033] - calculer l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ comme étant la différence entre l'observation à l'instant $(t+1)$ et la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$,
 - [0034] - déterminer le vecteur de coefficients du gain à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée,
 - [0035] - calculer le gain à l'instant $(t+1)$ en faisant une correction par approximation stochastique par moyennage des coefficients de gain du vecteur de coefficients du gain déterminé,
 - [0036] - calculer l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ comme étant la somme de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée et du produit du gain (K) à l'instant $(t+1)$ par l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée,

- [0037] - déterminer la position du dispositif à partir de l'estimation de l'état du système à l'instant (t+1) calculée.
- [0038] De préférence, le module de mesure est configuré pour borner les coefficients de gain variables entre un minimum et un maximum.
- [0039] De préférence, le module de mesure est configuré pour borner entre un minimum égal à une variable de bornage ϵ et un maximum égal à une variable de bornage $(2 - \epsilon)$.
- [0040] Avantageusement, le module de mesure comprend un réseau de neurones configuré pour réaliser les calculs en étant optimisé à partir d'un échantillon prédéterminé.
- [0041] Avantageusement, le module de mesure est configuré pour stocker et utiliser un modèle, représentatif du système, dépourvu du paramètre « accélération ».
- [0042] L'invention concerne également un dispositif, notamment mobile, comprenant un module de mesure tel que présenté précédemment.
- [0043] L'invention concerne également un système de géolocalisation par satellites, ledit système comprenant une pluralité de satellites, configurés pour émettre chacun des signaux de géolocalisation, et au moins un module tel que présenté précédemment et/ou au moins un dispositif tel que présenté précédemment.

Brève description des dessins

- [0044] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront encore à la lecture de la description qui va suivre. Celle-ci est purement illustrative et doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :
- [0045] [Fig.1] La [Fig.1] illustre schématiquement une forme de réalisation du système selon l'invention.
- [0046] [Fig.2] La [Fig.2] illustre schématiquement un mode de réalisation du procédé selon l'invention.
- [0047] [Fig.3] La [Fig.3] illustre un premier exemple de comparaison entre le filtre de Kalman et le procédé selon l'invention avec les mêmes données d'entrée.
- [0048] [Fig.4] La [Fig.4] illustre un exemple d'erreur sur la trajectoire d'un véhicule avec un filtre de Kalman (art antérieur).
- [0049] [Fig.5] La [Fig.5] illustre un exemple d'erreur sur la trajectoire d'un véhicule avec le procédé selon l'invention.

Description des modes de réalisation

- [0050] On a représenté à la [Fig.1] un exemple de système 1 de géolocalisation par satellites.
- [0051] Le système 1 comprend une constellation de satellites S1, S2, S3, S4 et un dispositif 10 selon l'invention. Sur la [Fig.1], seuls quatre satellites S1, S2, S3, S4 ont été représentés par souci de clarté, mais il va de soi que le système 1 peut comprendre plus de quatre satellites S1, S2, S3, S4, notamment des dizaines de satellites pour pouvoir géolocaliser un dispositif 10 dans la plupart des régions du globe, voire dans toutes les

régions du globe.

[0052] Chaque satellite S1, S2, S3, S4 est configuré pour émettre des signaux S10, S20, S30, S40 de géolocalisation.

[0053] Le dispositif 10, par exemple un smartphone ou un véhicule, comprend un module de mesure 100 configuré pour mesurer la position dudit dispositif 10 à partir des signaux S10, S20, S30, S40 émis par les satellites S1, S2, S3, S4.

[0054] Le module de mesure 100, embarqué dans le dispositif 10, est configuré pour recevoir des signaux S10, S20, S30, S40 émis par une pluralité de satellites S1, S2, S3, S4 de l'ensemble de satellites S1, S2, S3, S4.

[0055] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer la position et/ou la vitesse du dispositif 10 à un instant (t+1) à partir des signaux S10, S20, S30, S40 reçus, appelée « observation à l'instant (t+1) ».

[0056] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer la position p(t+1) et/ou la vitesse v(t+1) du dispositif 10 à l'instant (t+1) en utilisant des mesures et un modèle prédictif basé sur un filtre spécifique. Le modèle prédictif permet de déterminer l'état du système par itérations successives.

[0057] A cette fin, le module de mesure 100 est configuré pour déterminer une prédiction

[0058] [Math.1]

$$\hat{x}(t+1)$$

de l'état du système à un instant t+1 à partir de la prédiction

[0059] [Math.2]

$$\hat{x}(t)$$

réalisé à l'itération précédente à l'instant t, d'un gain K du filtre à l'instant t, d'un modèle Φ représentatif du système entre l'instant t et l'instant t+1 et de l'innovation

[0060] [Math.3]

$$\zeta(t+1)$$

du filtre à l'instant t+1. Le gain K est paramétré par un vecteur de coefficients de gain $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ variables. Une structure de gain possible, employée dans la présente mise en œuvre, est donnée par les équations [Math 36] et [Math 37] ci-après.

[0061] Les fonctions du module de mesure 100 permettant de mettre en œuvre ce modèle prédictif vont maintenant être décrites pour une itération réalisée à un instant t+1.

[0062] Le module de mesure 100 est configuré pour calculer la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant t+1, notée

[0063] [Math.4]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

, à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant t, notée

[0064] [Math.5]

$$\hat{x}(t)$$

, et d'un modèle Φ de paramètres représentatifs du système.

[0065] Le module de mesure 100 est configuré pour calculer la prédiction de l'observation à l'instant $t+1$, notée

[0066] [Math.6]

$$\hat{z}(t+1|t)$$

, comme étant le produit d'une matrice d'observation H prédéterminée et de la meilleure prédiction

[0067] [Math.7]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

de l'état du système à l'instant $t+1$ calculée.

[0068] Le module de mesure 100 est configuré pour calculer l'erreur de prédiction du filtre, appelée « innovation », notée

[0069] [Math.8]

$$\zeta(t+1)$$

, à l'instant $t+1$ comme étant la différence entre l'observation

[0070] [Math.9]

$$z(t+1)$$

à l'instant $t+1$ et la prédiction

[0071] [Math.10]

$$\hat{z}(t+1|t)$$

de l'observation à l'instant $t+1$.

[0072] Le module de mesure 100 est configuré pour calculer l'estimation de l'état du système à l'instant $t+1$ comme étant la somme de la meilleure prédiction

[0073] [Math.11]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

de l'état du système à l'instant $t+1$ calculée et du produit du gain K à l'instant $(t+1)$ par l'innovation du filtre

[0074] [Math.12]

$$\zeta(t+1)$$

à l'instant $t+1$ calculée.

[0075] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer le vecteur de coefficients du gain $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$. A cette fin, le module de mesure 100 peut être configuré pour calculer le gradient du carré de l'innovation du filtre

[0076] [Math.13]

$$\zeta(t+1)$$

à l'instant $t+1$ à partir des coefficients de gain $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ variables du gain K .

- [0077] Le module de mesure 100 est configuré pour calculer le gain K à l'instant $(t+1)$, de préférence en faisant une correction par approximation stochastique par moyennage des coefficients de gain $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ du vecteur de coefficients du gain déterminé afin d'améliorer la précision de la localisation. Dans le présent exemple, l'approximation stochastique par moyennage comprend la détermination d'un vecteur des coefficients de gain $\theta(t+1)$ à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ comme décrit ci-avant et sa mise en jour en le remplaçant par la moyenne des vecteurs de coefficients de gain mis à jour aux itérations précédentes $\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(t)$.
- [0078] Dans le cas où le modèle Φ est linéaire, cela revient à calculer le gain $K(t+1)$ à l'instant $(t+1)$ pour l'itération suivante par approximation stochastique par moyennage des gains $K(1), \dots, K(t)$ entre l'instant 1 et l'instant t .
- [0079] Le module de mesure 100 est configuré pour borner à chaque itération les coefficients de gain $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ variables entre un minimum et un maximum. De préférence, le minimum est égal à une variable de bornage ϵ et le maximum est égal à $(2 - \epsilon)$.
- [0080] Le modèle Φ est une matrice qui décrit la transition de l'état du système de l'instant t à l'instant $(t+1)$. De préférence, le modèle Φ sert à calculer la position et/ou la vitesse, de préférence à la fois la position et la vitesse, dans le vecteur d'état $x(t+1)$ mais est dépourvu de paramètre d'accélération, ce qui augmente la précision des prédictions et donc de la localisation. L'accélération présente dans le modèle est calculée en utilisant la vitesse estimée. Il est possible d'ajouter d'autres paramètres (associés ou non à des capteurs supplémentaires). Si le modèle est non-linéaire, cette matrice est obtenue par linéarisation. Elle peut être calculée une fois à la première itération puis conservée pour les itérations ultérieures.
- [0081] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$, notée
- [0082] [Math.14]
 $\hat{x}(t+1)$
 , comme étant la somme de la meilleure prédiction
- [0083] [Math.15]
 $\hat{x}(t+1|t)$
 de l'état du système à l'instant $t+1$ et du produit du gain K à l'instant $t+1$ par l'innovation
- [0084] [Math.16]
 $\zeta(t+1)$
 du filtre à l'instant $t+1$:

[0085] [Math.17]

$$\hat{x}(t+1) = \hat{x}(t) + K(\theta(t+1))\zeta(t+1)$$

[0086] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer la position du dispositif 10 à l'instant (t+1) à partir de l'estimation de l'état du système à l'instant (t), notée

[0087] [Math.18]

$$\hat{x}(t)$$

[0088] L'état du système $x(t+1)$ est un vecteur colonne comportant les coordonnées de position du dispositif 10 à l'instant (t+1) et les coordonnées de vitesse du dispositif 10 à l'instant (t+1) :

[0089] [Math.19]

$$\begin{bmatrix} p(t+1) \\ v(t+1) \end{bmatrix}$$

[0090] Le module de mesure 100 est configuré pour déterminer l'estimation des coordonnées de position au temps (t+1) par projection de l'estimation de l'état du système

[0091] [Math.20]

$$\hat{x}(t+1)$$

à l'instant (t+1).

[0092] Dans ce cas, l'évolution de la position du dispositif 10 peut être décrite selon l'équation suivante :

[0093] [Math.21]

$$p(t+1) = p(t) + dt.v(t) + \frac{dt^2}{2}.a(t) + w(t)$$

[0094] De même, l'évolution de la vitesse du dispositif 10 peut être décrite selon l'équation suivante :

[0095] [Math.22]

$$v(t+1) = v(t) + a(t).dt + w'(t)$$

[0096] Il existe donc une matrice Φ telle que $x(t+1) = \Phi \cdot x(t) + A(t) + W(t)$, où le bruit $W(t)$ est le vecteur colonne $(w(t), w'(t))$, et où $A(t)$ est une fonction qui ne dépend que de l'accélération. Cette matrice Φ est le modèle intervenant dans l'algorithme et est définie de préférence une seule fois avant ou lors de la première itération.

[0097] Le module de mesure 100 comprend au moins un processeur apte à mettre en œuvre un ensemble d'instructions permettant de réaliser ces fonctions.

[0098] Exemple de mise en œuvre

[0099] Un exemple de mise en œuvre du procédé de mesure de la position du dispositif 10 va maintenant être décrit en référence notamment à la [Fig.2].

[0100] On considère que le procédé a été préalablement mis en œuvre pendant t itérations entre un instant 1 et un instant (t). Les étapes du procédé sont décrites ci-après pour l'instant ($t+1$).

[0101] Dans une étape E1, le dispositif reçoit les signaux S10, S20, S30, S40 émis par les satellites S1, S2, S3, S4 puis le module de mesure 100 détermine, dans une étape E2 la position et la vitesse du dispositif à l'instant ($t+1$) à partir des signaux reçus, appelée « observation à l'instant ($t+1$) » notée

[0102] [Math.23]

$$z(t+1)$$

de manière connue en soi.

[0103] Le module de mesure 100 calcule ensuite, dans une étape E3, la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant ($t+1$), notée

[0104] [Math.24]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

, à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant (t) (déterminée à l'itération précédente t), notée

[0105] [Math.25]

$$\hat{x}(t)$$

[0106] et d'un modèle représentatif du système entre l'instant (t) et l'instant ($t+1$), noté Φ :

[0107] [Math.26]

$$\hat{x}(t+1|t) = \Phi \hat{x}(t) + B \hat{a}(t)$$

[0108] où

[0109] [Math.27]

$$\hat{a}(t)$$

est l'estimation de l'accélération et B est la matrice des coefficients issue du développement limité à l'ordre 2 des positions et à l'ordre 1 des vitesses.

[0110] Le module de mesure 100 calcule ensuite, dans une étape E4, la prédiction

[0111] [Math.28]

$$\hat{z}(t+1|t)$$

de l'observation à l'instant $t+1$ comme étant le produit d'une matrice d'observation H prédéterminée et de la meilleure prédiction

[0112] [Math.29]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

de l'état du système à l'instant $t+1$ calculée à l'étape E3:

[0113] [Math.30]

$$\hat{z}(t+1|t) = H\hat{x}(t+1|t)$$

.

[0114] Le module de mesure 100 calcule ensuite, dans une étape E5, l'innovation du filtre à l'instant t+1, notée

[0115] [Math.31]

$$\zeta(t+1)$$

comme étant la différence entre l'observation à l'instant t+1, notée

[0116] [Math.32]

$$z(t+1)$$

calculée à l'étape E2, et la prédiction

[0117] [Math.33]

$$\hat{z}(t+1|t)$$

de l'observation à l'instant t+1 calculée à l'étape E4 :

[0118] [Math.34]

$$\zeta(t+1) = z(t+1) - \hat{z}(t+1|t)$$

.

[0119] A l'itération courante (t+1), le dispositif calcule ensuite, dans une étape E6, les coefficients

[0120] [Math.35]

$$\theta(t+1) = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$$

du gain K à l'instant t+1.

[0121] A cette fin, le module de mesure 100 minimise l'espérance du carré de la norme de l'innovation

[0122] [Math.36]

$$\zeta(t+1)$$

du filtre à l'instant t+1 à partir de l'équation :

[0123] [Math.37]

$$E \|\zeta(t+1, \theta)\|^2 = \operatorname{argmin}_{\theta} (E \|\zeta(t+1, \theta)\|^2)$$

.

[0124] Cette équation peut par exemple être résolue numériquement à partir de la méthode connue SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation), cette méthode connue nécessitant le calcul du gradient de la norme au carré de l'innovation à l'instant (t+1) pour déterminer le minimum.

[0125] La résolution de cette équation permet de déterminer le vecteur $\theta(t+1) = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ qui minimise l'espérance du carré de la norme de l'innovation à l'instant (t+1).

[0126] Le module de mesure 100 calcule ensuite, dans une étape E7, le gain $K(\theta(t+1))$ à

l'instant t+1 de préférence à partir du vecteur θ calculé à l'étape E6 selon la formule suivante :

[0127] [Math.38]

$$K = \theta(t+1).K_0$$

[0128] où

[0129] [Math.39]

$$\theta(t+1) = \text{diag}[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$$

[0130] [Math.40]

$$K_0 = M H^T [H M H^T + R]^{-1}$$

[0131] Où

[0132] [Math.41]

$$M = \Phi P_0 \Phi^T + Q$$

[0133] P_0 peut être la matrice de covariance initiale utilisée de manière connue dans un filtre de Kalman de l'art antérieur,

[0134] Q est une matrice symétrique semi-définie positive arbitraire, mais de préférence choisie proche de la matrice de covariance du bruit du modèle, c'est-à-dire du bruit $W(t)$ dans l'équation $x(t+1) = \Phi.x(t) + W(t)$ décrite ci-avant.

[0135] Le dispositif calcule ensuite, dans une étape E8, l'estimation de l'état du système à l'instant (t+1), notée

[0136] [Math.42]

$$\hat{x}(t+1)$$

, comme étant la somme de la meilleure prédiction

[0137] [Math.43]

$$\hat{x}(t+1|t)$$

de l'état du système à l'instant t+1 calculée à l'étape E3, et du produit du gain K à l'instant t+1 (calculé à l'étape E7) par l'innovation

[0138] [Math.44]

$$\zeta(t+1)$$

du filtre à l'instant t+1 (calculée à l'étape E5:

[0139] [Math.45]

$$\hat{x}(t+1) = \hat{x}(t+1|t) + K(\theta(t+1))\zeta(t+1)$$

[0140] Cette estimation

[0141] [Math.46]

$$\hat{x}(t+1)$$

de l'état du système à l'instant $t+1$ sera ensuite utilisée lors de l'étape E3 de l'itération suivante à l'instant $t+2$.

[0142] La position $p(t+1)$ du dispositif 10 est déterminée à l'instant $(t+1)$ dans une étape E9.

[0143] L'état du système $x(t+1)$ est un vecteur colonne comportant les coordonnées de position du dispositif 10 à l'instant $(t+1)$ et les coordonnées de vitesse du dispositif 10 à l'instant $(t+1)$:

[0144] [Math.47]

$$\begin{bmatrix} p(t+1) \\ v(t+1) \end{bmatrix}$$

[0145] L'estimation des coordonnées de position au temps $(t+1)$ est obtenue par projection de l'estimation de l'état du système

[0146] [Math.48]

$$\hat{x}(t+1)$$

à l'instant $(t+1)$.

[0147] Ainsi, l'évolution de la position du dispositif 10 est décrite selon l'équation suivante :

[0148] [Math.49]

$$p(t+1) = p(t) + dt.v(t) + \frac{dt^2}{2}.a(t) + w(t)$$

[0149] De même, l'évolution de la vitesse du dispositif 10 est décrite selon l'équation suivante :

[0150] [Math.50]

$$v(t+1) = v(t) + a(t).dt + w'(t)$$

[0151] Il existe donc une matrice Φ telle que $x(t+1) = \Phi. x(t) + A(t) + W(t)$, où le bruit $W(t)$ est le vecteur colonne $(w(t), w'(t))$, et où $A(t)$ est une fonction qui ne dépend que de l'accélération. Cette matrice Φ est le modèle décrit précédemment intervenant dans l'algorithme et est définie de préférence une seule fois avant ou lors de la première itération.

[0152] Exemples de simulations

[0153] On a représenté sur la [Fig.3] un exemple de comparaison de l'erreur quadratique entre la trajectoire réelle et la trajectoire estimée (c'est-à-dire la norme au carré de la différence des trajectoires réelle et estimée à chaque instant) avec un procédé de l'art antérieur basé sur un filtre de Kalman (courbe du haut AA, légendée « Error NN TKF ») et avec le procédé selon l'invention (courbe du bas INV, légendée « Error NN TAF ») pour un dispositif 10 mobile passant sous un pont entre deux instants t_1 et t_2 .

[0154] L'axe des abscisses représente le nombre d'itérations du procédé. L'axe des ordonnées représente l'erreur quadratique (en mètre), c'est-à-dire le carré de l'écart entre la trajectoire estimée et la trajectoire de référence.

[0155] On constate que le procédé de l'art antérieur basé sur un filtre de Kalman génère une

erreur atteignant plus de cinq mètres alors que le procédé selon l'invention génère une erreur ne dépassant pas 0,3 mètre.

[0156] La [Fig.4] illustre un exemple montrant l'erreur obtenu sur une trajectoire donnée avec un filtre de Kalman de l'art antérieur.

[0157] L'axe des abscisses représente une distance (en mètre) selon une première direction. L'axe des ordonnées représente une distance (en mètre) selon une deuxième direction. Le trait noir représente la trajectoire réelle REAL suivie par le dispositif 10 mobile (ensemble des positions réelles). Le trait clair représente les positions mesurées en l'absence de filtrage MEAS. Le trait gris intermédiaire représente les positions mesurées avec un filtrage de Kalman de l'art antérieur AA.

[0158] La [Fig.5] illustre un exemple montrant l'erreur obtenu sur la même trajectoire donnée avec un filtre selon l'invention.

[0159] L'axe des abscisses représente une distance (en mètre) selon une première direction. L'axe des ordonnées représente une distance (en mètre) selon une deuxième direction. Le trait noir représente la trajectoire réelle REAL suivie par le dispositif 10 mobile (ensemble des positions réelles). Le trait clair représente les positions mesurées en l'absence de filtrage MEAS. Le trait gris intermédiaire représente les positions mesurées avec un filtrage selon l'invention INV.

[0160] On constate que les positions déterminées avec le filtre selon l'invention sont significativement plus proches de la trajectoire réelle que celles déterminées avec un filtre de Kalman de l'art antérieur.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de mesure de la position géographique d'un dispositif (10) à partir d'un réseau de satellites (S1, S2, S3, S4) dans un système prédictif à filtre de gain (K) variable, ledit gain (K) étant représenté par un vecteur de coefficients de gain variables, ledit procédé, mis en œuvre par le dispositif (10), comprenant à chaque itération suivant un instant t les étapes de :

- réception (E1) de signaux (S10, S20, S30, S40) émis par une pluralité de satellites (S1, S2, S3, S4) du réseau de satellites (S1, S2, S3, S4),
- détermination (E2) de la position et/ou de la vitesse du dispositif (10) à un instant $(t+1)$ à partir des signaux (S10, S20, S30, S40) reçus, appelée « observation à l'instant $(t+1)$ »,
- calcul (E3) de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant (t) et d'un modèle représentatif du système entre l'instant (t) et l'instant $(t+1)$,
- calcul (E4) de la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$ comme étant le produit d'une matrice d'observation prédéterminée et de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée,
- calcul (E5) de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ comme étant la différence entre l'observation à l'instant $(t+1)$ et la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$,
- détermination (E6) le vecteur de coefficients du gain à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée à l'étape précédente,
- calcul (E7) du gain à l'instant $(t+1)$ en faisant une correction par approximation stochastique par moyennage des coefficients de gain du vecteur de coefficients du gain déterminé,
- calcul (E8) de l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ comme étant la somme de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée et du produit du gain (K) à l'instant $(t+1)$ par l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée,
- détermination (E9) de la position du dispositif (10) à partir de l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre, à chaque itération, une étape de bornage des coefficients de gain variables entre un minimum et un maximum.

- [Revendication 3] Procédé selon la revendication précédente, dans lequel le minimum est égal à une variable de bornage ϵ et le maximum est égal à $(2 - \epsilon)$.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les calculs sont réalisés par un réseau de neurones à partir d'un échantillon prédéterminé.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le modèle décrivant le passage de l'état du système à l'instant t à l'état à l'instant $(t+1)$, est dépourvu de l'accélération.
- [Revendication 6] Produit programme d'ordinateur caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble d'instructions de code de programme qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ou plusieurs processeurs, configurent le ou les processeurs pour mettre en œuvre un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.
- [Revendication 7] Module de mesure (100) de la position géographique d'un dispositif (10) à partir d'un réseau de satellites dans un système prédictif à filtre de gain K variable, ledit gain K étant représenté par un vecteur de paramètres variables, ledit module de mesure (100), embarqué dans ledit dispositif (100), étant configuré pour :
- recevoir des signaux émis par une pluralité de satellites du réseau de satellites,
 - déterminer la position et/ou de la vitesse du dispositif à un instant $(t+1)$ à partir des signaux reçus, appelée « observation à l'instant $(t+1)$ »,
 - calculer la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ à partir d'une estimation prédéterminée de l'état du système à l'instant (t) et d'un modèle représentatif du système entre l'instant (t) et l'instant $(t+1)$,
 - calculer la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$ comme étant le produit d'une matrice d'observation prédéterminée et de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée,
 - calculer l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ comme étant la différence entre l'observation à l'instant $(t+1)$ et la prédiction de l'observation à l'instant $(t+1)$,
 - déterminer le vecteur de coefficients du gain à l'instant $(t+1)$ par minimisation du carré de la norme de l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$,
 - calculer le gain à l'instant $(t+1)$ en faisant une correction par approximation stochastique par moyennage des coefficients de gain du vecteur de coefficients du gain déterminé,
 - calculer l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ comme étant

la somme de la meilleure prédiction de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée et du produit du gain (K) à l'instant $(t+1)$ par l'innovation du filtre à l'instant $(t+1)$ calculée,

- déterminer la position du dispositif (10) à partir de l'estimation de l'état du système à l'instant $(t+1)$ calculée.

[Revendication 8] Module de mesure (100) selon la revendication précédente, ledit module étant configuré pour borner les coefficients de gain variables entre un minimum et un maximum.

[Revendication 9] Dispositif (10), notamment mobile, comprenant un module de mesure (100) selon l'une quelconque des revendications 7 ou 8.

[Revendication 10] Système (1) de géolocalisation par satellites, ledit système (1) comprenant une pluralité de satellites, configurés pour émettre chacun des signaux de géolocalisation, et au moins un module de mesure (100) selon l'une quelconque des revendications 7 ou 8 et/ou au moins un dispositif (10) selon la revendication 9.

[Fig. 1]

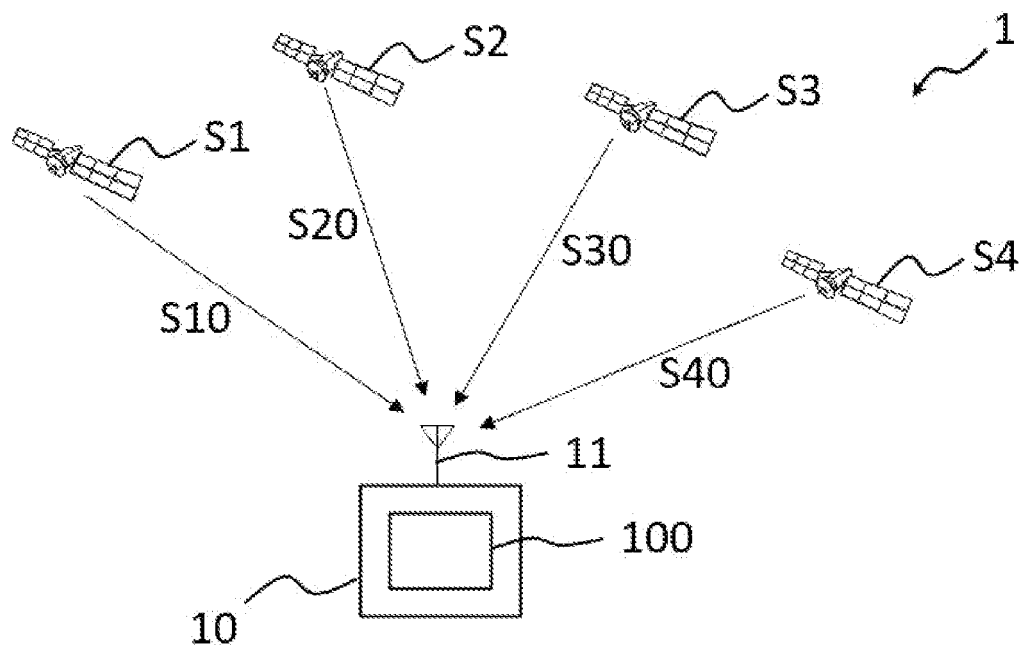


FIGURE 1

[Fig. 2]

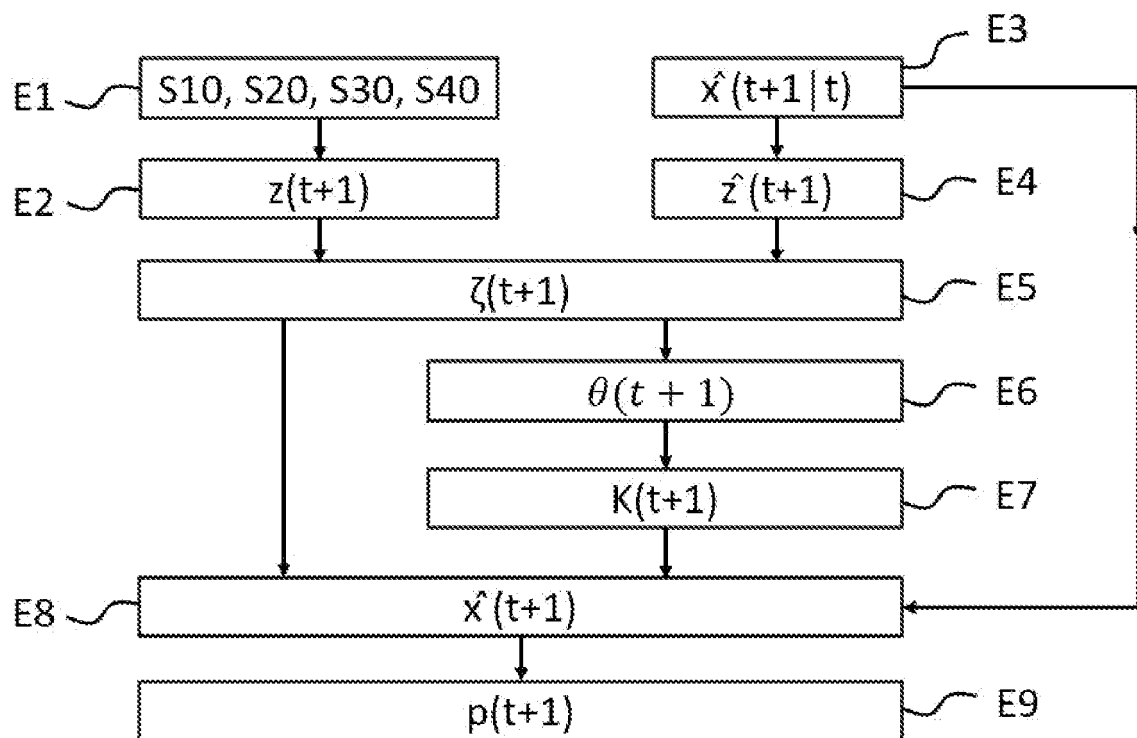


FIGURE 2

[Fig. 3]

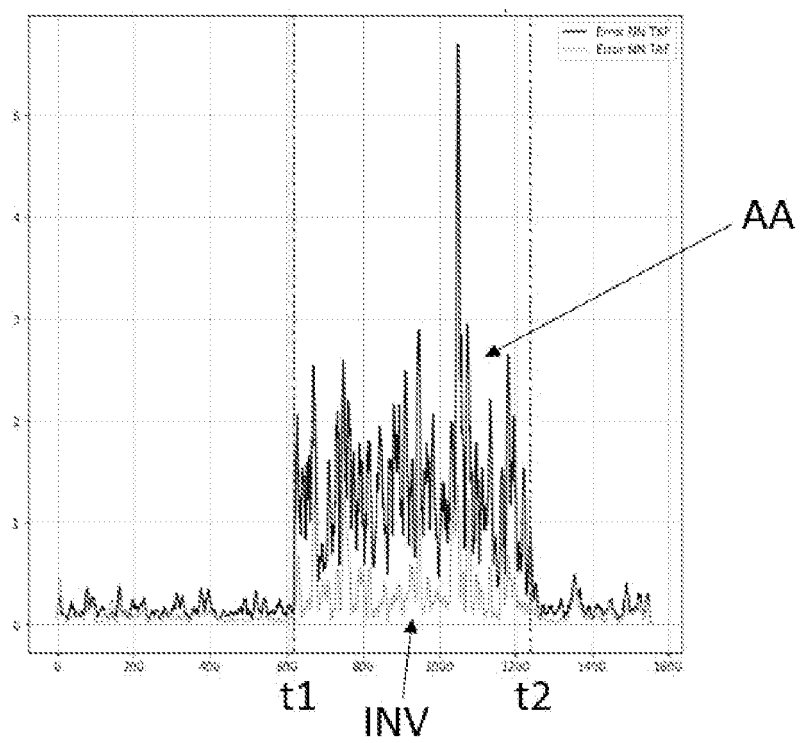


FIGURE 3

[Fig. 4]

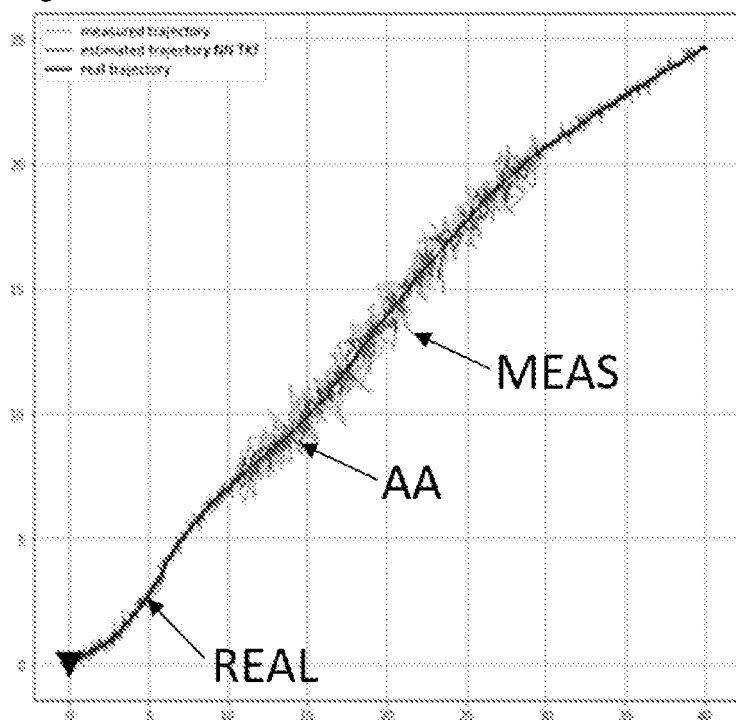


FIGURE 4

[Fig. 5]

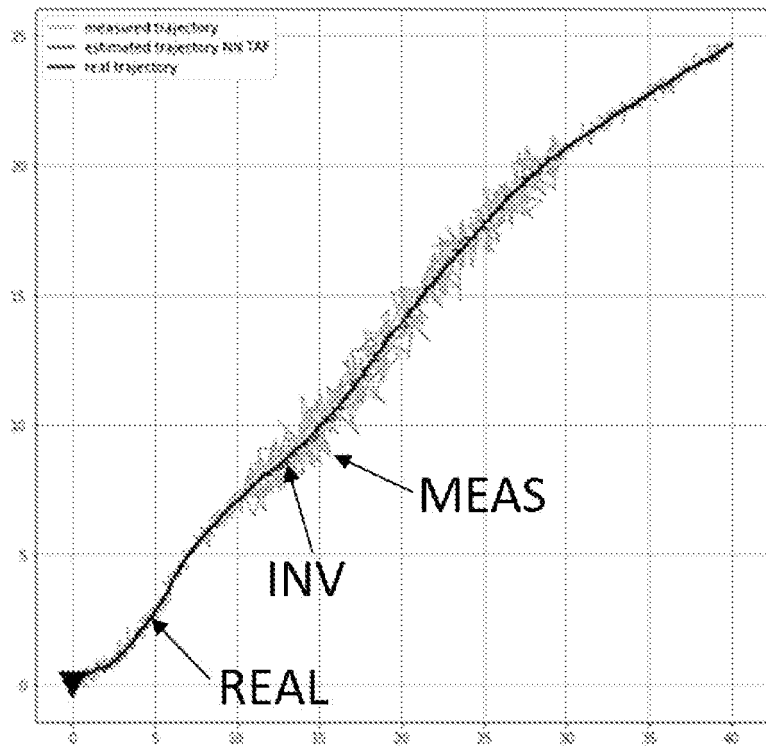


FIGURE 5