(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 137 764***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **22 07063**

(51) Int Cl[8] : ***G 01 S 19/00*** *(2022.01)*

(12) **BREVET D'INVENTION** **B1**

(54) Procédé de recalage d'une attitude fournie par un système de navigation à l'estime au moyen d'un système de positionnement relatif.

(22) **Date de dépôt :** 08.07.22.

(30) **Priorité :**

(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 :** 12.07.24 Bulletin 24/28.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *SYSNAV Société par actions simplifiée (SAS)* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** VISSIERE DAVID, HILLION MATHIEU, LEBEL DAVID et LUCAS MAXIME.

(73) **Titulaire(s) :** SYSNAV Société par actions simplifiée (SAS).

(74) **Mandataire(s) :** REGIMBEAU.

FR 3 137 764 - B1

Description

Titre de l'invention : Procédé de recalage d'une attitude fournie par un système de navigation à l'estime au moyen d'un système de positionnement relatif

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne les techniques de navigation à l'estime, plus particulièrement les techniques de recalage d'une attitude fournie par un système de navigation à l'estime. Elle trouve une application avantageuse dans le cas de déplacements en milieu urbain ou « indoor », c'est-à-dire à l'intérieur des bâtiments.

Arrière-plan technologique

[0002] Il est aujourd'hui commun de suivre la position d'un objet par multi-latération, en mesurant les distances entre un récepteur attaché à l'objet et au moins trois sources dont la localisation dans l'environnement est connue. C'est par exemple le cas avec les systèmes de positionnement du type GNSS (Global Navigation Satellite System, par exemple le GPS) ou profitant de l'infrastructure d'un réseau de communication sans fil (par exemple réseau wifi, réseau GSM, etc.). Ces méthodes s'avèrent cependant très limitées car elles ne permettent pas d'assurer disponibilité et précision de l'information, l'une et l'autre étant affectées par d'éventuels masquages entre les sources et le récepteur. Leur utilisation dans un milieu urbain ou « indoor » nécessite donc de déployer une infrastructure coûteuse avec de nombreuses sources réparties dans l'environnement. Elles s'avèrent également dépendantes de technologies extérieures comme les satellites pour le GNSS qui peuvent être indisponibles voire volontairement brouillées.

[0003] Alternativement, on connait aussi des méthodes dites de navigation à l'estime (« dead reckoning » en anglais) pour suivre dans n'importe quel environnement la position relative d'un objet grâce à un capteur de mouvement mesurant le mouvement de l'objet. Par position relative, on entend la position de l'objet dans l'espace par rapport à un point et à un repère donnés à l'initialisation. En plus de la position, ces méthodes permettent également d'obtenir l'orientation (également appelée « attitude ») de l'objet par rapport au même repère initial, laquelle est donnée, en dimension 3, par les angles d'Euler (roulis φ, tangage θ, lacet ψ) et, en dimension 2, par le cap ψ. Ces méthodes sont préférées en cas de déplacement dans un milieu où le suivi de position par multi-latération est difficile, par exemple les milieux urbains ou « indoor ».

[0004] Il existe différents types de navigation à l'estime. La plus courante est la navigation dite inertielle « simple », telle que mise en œuvre dans les applications lourdes comme la navigation des avions de chasse ou de ligne, des sous-marins, des navires, etc. Elle

repose sur des centrales inertielles comprenant généralement un minimum de trois accéléromètres et de trois gyromètres disposés en triaxe. Typiquement, les gyromètres « maintiennent » un repère, dans lequel une double intégration temporelle des mesures des accéléromètres permet d'estimer le mouvement. Il est notablement connu que pour pouvoir utiliser cette méthode de navigation inertielle « simple », il est nécessaire d'utiliser des capteurs de très haute précision. En effet la double intégration temporelle d'une mesure d'accélération fait qu'une erreur constante d'accélération crée une erreur de position qui augmente de façon proportionnelle au carré du temps.

[0005] Une autre technique de navigation à l'estime connue est la technique dans laquelle l'information de vecteur vitesse dans le repère de l'objet est fournie par une source externe (par exemple un odomètre pour une voiture, un loch pour un bateau ou un tube de Pitot pour un avion). Il suffit alors d'appliquer une simple intégration à cette information de vecteur vitesse et de la combiner à une information d'orientation et notamment de cap de l'objet pour connaître sa trajectoire. Pour une même imprécision de mesure des capteurs, la dérive temporelle est alors moins sensible.

[0006] Le plus souvent, l'attitude initiale est connue, par exemple par « alignement » initial d'un dispositif inertiel ou par fourniture par des capteurs autres qu'inertiels (par exemple magnétiques). Cependant, l'imprécision de mesure des capteurs inertiels induit une dérive temporelle de l'attitude mesurée, ce qui rend la connaissance de l'attitude initiale caduque au bout d'un temps plus ou moins long dépendant de la précision des capteurs employés et conduit à des imprécisions sur la localisation de l'objet. Par exemple, une erreur de 1% sur la mesure en cap conduit, au terme d'un déplacement de 100 m, à une imprécision de 1 m sur la localisation de l'objet.

[0007] Pour y remédier, il est connu de recaler régulièrement les mesures d'un système de navigation à l'estime au moyen d'un autre système de positionnement, de sorte à maintenir au mieux l'information d'orientation de l'objet, en particulier l'information de cap. Par exemple, il est connu de WO 2019/020961 de recaler l'information d'orientation en utilisant une mesure de cap magnétique obtenue par un magnétomètre porté par l'objet.

[0008] Cette solution ne donne cependant pas entière satisfaction. En effet, les magnétomètres souffrent de leurs propres imprécisions et dérives qui font que leurs mesures sont parfois insuffisamment fiables pour les utiliser comme base de recalage. En outre, cette solution nécessite d'intégrer des magnétomètres à l'objet dont on veut suivre la position, ce qui en augmente le coût.

Exposé de l'invention

[0009] Un objectif de l'invention est de proposer une solution simple et économique pour recaler une attitude fournie par un système de navigation à l'estime. Un autre objectif

est de permettre un tel recalage avec une grande précision sur une faible distance. Un autre objectif est de permettre, de manière simple et économique, un suivi précis des personnes se déplaçant à l'intérieur d'un bâtiment.

[0010] A cet effet, l'invention a pour objet, selon un premier aspect, un procédé de recalage d'attitude pour recaler une attitude fournie par un système de navigation à l'estime, le procédé de recalage comprenant les étapes suivantes :

[0011]
- estimation, par le système de navigation à l'estime, pour chacun d'une pluralité d'instants de détermination compris dans un intervalle de déplacement durant lequel le système de navigation à l'estime se déplace suivant une trajectoire de déplacement, d'une position estimée du système de navigation à l'estime dans un repère fixe arbitraire audit instant de détermination,
- obtention, pour chaque instant de détermination, d'une position évaluée du système de navigation à l'estime audit instant de détermination dans un repère fixe prédéterminé, ladite position évaluée ayant été évaluée par un système de positionnement relatif, et
- déduction d'au moins un paramètre de recalage d'attitude par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées aux positions estimées corrigées au moyen du ou de chaque paramètre de recalage.

[0012] Selon des modes de réalisation particuliers de l'invention, le procédé de recalage d'attitude présente également l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toute(s) combinaison(s) techniquement possible(s) :

[0013]
- le système de navigation à l'estime est porté par un piéton, le système de système de navigation à l'estime étant de préférence attaché à un pied ou à une cheville du piéton ;
- le système de navigation à l'estime comporte un capteur de mouvement pour mesurer un mouvement du système de navigation à l'estime et une unité de traitement pour déduire du mouvement mesuré une attitude et une position du système de navigation à l'estime ;
- le système de positionnement relatif est choisi parmi : un système de multi-angulation, un système de multi-latération, un système de mise en correspondance de carte et un système de positionnement visuel, le système de positionnement relatif comprenant de préférence un dispositif de télémétrie sur bande ultralarge ;
- le repère fixe arbitraire et le repère fixe prédéterminé partagent un axe commun, un paramètre de recalage d'attitude étant constitué par un paramètre, de préférence un angle, de modification d'orientation par rotation autour dudit axe commun ;

- l'axe commun est un axe vertical ;
- la fonction de coût est représentative d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées et les positions estimées après application aux positions évaluées ou estimées d'une transformation géométrique comprenant une rotation et, de préférence, une translation ;
- la rotation est autour d'un axe de rotation et la translation est suivant une direction orthogonale audit axe de rotation ;
- l'étape de déduction du paramètre de recalage comprend le calcul d'une valeur candidate pour le paramètre de recalage, l'évaluation d'une valeur de précision de ladite valeur candidate, la comparaison de ladite valeur de précision avec une valeur de précision antérieure associée à une valeur courante du paramètre de recalage, et la détermination d'une valeur future du paramètre de recalage, fonction de la valeur candidate et de la valeur courante, en fonction du résultat de la comparaison.
- la valeur de précision est fonction d'incertitudes sur les positions estimées et les positions évaluées et/ou d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées et les positions estimées après application de la valeur candidate du paramètre de recalage.
- la déduction du paramètre de recalage comprend les sous-étapes suivantes :
  - a) calcul d'une première valeur candidate pour le paramètre de recalage par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées pour N instants de détermination aux positions estimées pour lesdits N instants de détermination corrigées au moyen du paramètre de recalage,
  - b) calcul d'une première valeur de précision associée à ladite première valeur candidate,
  - c) calcul d'une deuxième valeur candidate pour le paramètre de recalage par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées pour N-1 instants de détermination, correspondant auxdits N instants de détermination moins l'instant de détermination le plus ancien, aux positions estimées pour lesdits N-1 instants de détermination corrigées au moyen du ou de chaque paramètre de recalage,
  - d) calcul d'une deuxième valeur de précision associée à ladite deuxième valeur candidate,
  - e) comparaison des première et deuxième valeurs de précision, et
  - f) sélection de la première valeur candidate lorsque la première valeur de précision reflète la meilleure précision ;

- lorsque la valeur de précision reflétant la meilleure précision est constituée par la deuxième valeur de précision, la déduction du paramètre de recalage comprend les sous-étapes supplémentaires suivantes :
  - suppression de la position évaluée et de la position estimée pour l'instant de détermination le plus ancien, et
  - répétition des sous-étapes a) à e) avec un nombre N réduit de 1 ; et
- le système de navigation à l'estime a une précision en distance parcourue de l'ordre de quelques pourcents, par exemple entre 1 et 3%, et de quelques dizaines de degrés par heure, par exemple entre 30 et 80 degrés par heure, en dérive de cap, et le système de positionnement relatif a une précision de quelques dizaines de centimètres, par exemple entre 20 cm et 1 m, en position.

[0014] L'invention a également pour objet, selon un deuxième aspect, un procédé de localisation d'un objet dans un espace prédéfini, le procédé comprenant les étapes suivantes :

[0015]
- démarrage du système de navigation à l'estime,
- recalage en attitude du système de navigation à l'estime à l'aide d'un système de positionnement relatif comprenant une infrastructure installée au niveau d'un point d'accès à l'espace prédéfini, de manière à obtenir un paramètre de recalage d'attitude, ledit recalage en attitude mettant en œuvre un procédé de recalage en attitude selon l'une quelconque des revendications précédentes,
- recalage en position du système de navigation à l'estime à l'aide d'un système de positionnement relatif comprenant une infrastructure installée au niveau dudit point d'accès à l'espace prédéfini, de manière à obtenir un paramètre de recalage de position, et
- calcul, par le système de navigation à l'estime, au moyen du paramètre de recalage en attitude et du paramètre de recalage en position, d'une position calculée du système de navigation à l'estime dans le repère prédéterminé.

[0016] Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, le procédé de localisation présente également la caractéristique suivante :

[0017]
- l'infrastructure est embarquée à bord d'un véhicule lui-même équipé d'un système de localisation et d'orientation permettant de calculer la position de l'infrastructure dans le repère prédéterminé.

[0018] L'invention a encore pour objet, selon un troisième aspect, un système de navigation à l'estime comportant un capteur de mouvement pour mesurer un mouvement du système de navigation à l'estime et une unité de traitement pour déduire du mouvement mesuré une attitude et une position du système de navigation à l'estime dans un repère fixe, l'unité de traitement étant configurée pour mettre en œuvre un procédé de recalage d'attitude selon le premier aspect pour recaler ladite attitude.

[0019] Selon un quatrième aspect, l'invention a pour objet un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de recalage d'attitude selon le premier aspect lorsque ledit programme est exécuté par un processeur.

[0020] Enfin, selon un cinquième aspect, l'invention a pour objet un moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel est enregistré un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de recalage d'attitude selon le premier aspect.

Brève description des Figures

[0021] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

[0022]
- la [Fig.1] est une vue de dessus d'un système de localisation d'un objet dans un espace prédéfini selon un exemple de réalisation de l'invention,
- la [Fig.2] est une vue en perspective d'un détail du système de localisation de la [Fig.1],
- la [Fig.3] est un schéma d'un boîtier de localisation du système de localisation de la [Fig.1],
- la [Fig.4] est un diagramme illustrant un exemple de procédé de localisation d'objet dans un espace prédéfini mis en œuvre par le système de la [Fig.1],
- la [Fig.5] est un diagramme illustrant une étape de recalage de cap du procédé de la [Fig.4], et
- la [Fig.6] est un diagramme illustrant une sous-étape de déduction d'un paramètre de recalage de cap de l'étape de recalage de cap de la [Fig.5].

Description détaillée d'un exemple de réalisation

[0023] Le système de localisation 10 représenté sur la [Fig.1] est destiné à la localisation d'objets d'intérêt 12 à l'intérieur d'un espace prédéfini 14. A cet effet, le système de localisation 10 comprend une pluralité de boîtiers de localisation 16 chacun attaché à un objet d'intérêt 12 respectif. Ici, le système de localisation 10 comprend également une infrastructure de localisation 18 agencée au niveau d'au moins un point d'accès 19 à l'espace prédéfini 14.

[0024] En référence à la [Fig.2], chaque objet d'intérêt 12 est ici constitué par un piéton. L'invention est particulièrement avantageuse dans une telle utilisation car elle permet un encombrement très réduit des boîtiers 16, qui peuvent ainsi être facilement portés de manière ergonomique par des piétons. En variante (non représentée), les objets d'intérêts 12 sont constitués par tout objet mobile dont la connaissance de la position est souhaitée, par exemple un véhicule à roues, un drone, etc.

[0025] L'espace prédéfini 14 est typiquement constitué par un intérieur de bâtiment. Il s'agit par exemple d'un site industriel, les piétons 12 étant alors typiquement des techniciens travaillant sur ledit site industriel. En variante, l'espace prédéfini 14 est un site d'intervention, par exemple un bâtiment en feu ou un lieu de prise d'otage, les piétons 12 étant alors des pompiers ou des fantassins intervenant sur ledit site.

[0026] Chaque boîtier de localisation 16 est typiquement attaché à un membre, ici une jambe, de préférence un pied ou une cheville, du piéton 12. A cet effet, chaque boîtier de localisation 16 comprend, comme visible sur la [Fig.3], un organe d'attache 20 constitué ici par un bracelet par exemple à bande autoagrippante qui enserre le membre et permet la liaison solidaire. En variante (non représenté), l'organe d'attache 20 est constitué par tout élément permettant une liaison solidaire du boîtier de localisation 16 avec l'objet d'intérêt 12.

[0027] Toujours en référence à la [Fig.3], le boîtier de localisation 12 comprend un système de navigation à l'estime 22. Il comprend également un système de positionnement relatif 24. Dans l'exemple représenté il comprend encore un système de communication 26, typiquement un système de communication sans fil, pour la communication du boîtier de localisation 12 avec un dispositif externe tel qu'un terminal mobile 29 ([Fig.2]), par exemple un mobile multifonction, voire un serveur distant (non représenté). Optionnellement il comprend un module de stockage 28.

[0028] Le système de navigation à l'estime 22 comprend un capteur de mouvement 30 pour mesurer un mouvement du système de navigation à l'estime 22 et une unité de traitement 32 pour déduire du mouvement mesuré une attitude et une position du système de navigation à l'estime 22 dans un repère fixe prédéterminé, par exemple le repère Est-Nord-Haut (mieux connu sous acronyme ENU, de l'anglais « East-North-Up »). Par « repère fixe », on entend ici et dans la suite que le repère est immobile dans le référentiel terrestre.

[0029] Dans l'exemple décrit ici, le système de navigation à l'estime 22 est configuré pour travailler dans un repère bidimensionnel et pour ne fournir qu'un cap et deux coordonnées de position du système de navigation à l'estime 22 dans un plan horizontal du repère prédéterminé. En variante (non représentée), le système de navigation à l'estime 22 est configuré pour travailler dans un repère tridimensionnel et donc pour fournir un angle de roulis, un angle de tangage et un angle de lacet du système de navigation à l'estime 22, ainsi que ses trois coordonnées de position dans le repère prédéterminé. L'homme du métier saura aisément transposer au cas tridimensionnel l'exemple donné ici du cas bidimensionnel.

[0030] Le capteur de mouvement 30 comprend un gyromètre 40 pour mesurer une vitesse angulaire du système de navigation à l'estime 22 selon un système de trois axes orthogonaux définissant un repère mobile solidaire du boîtier 16, i.e. mesurer les trois

composantes d'un vecteur de vitesse angulaire dans ledit repère mobile. On comprend ainsi que le gyromètre 40 peut en fait désigner un ensemble de trois gyromètres associés à un des trois axes, en particulier en tri-axe (i.e. chacun apte à mesure une des trois composantes du vecteur de vitesse angulaire).

[0031] Le capteur de mouvement 30 comprend également un organe 42 d'acquisition d'une vitesse linéaire du système de navigation à l'estime 22, c'est-à-dire du déplacement. Cet organe d'acquisition 42 peut permettre d'obtenir la vitesse linéaire directement ou indirectement, et ainsi être de type varié.

[0032] Par exemple, l'organe d'acquisition 42 peut être constitué par un ou plusieurs accéléromètres (non représentés). Ces accéléromètres sont avantageusement disposés en tri-axe, typiquement selon le même système de trois axes orthogonaux que le gyromètre 40. Ils sont sensibles aux forces extérieures autres que gravitationnelles appliquées sur le capteur 30, et permettent de mesurer une accélération spécifique. La vitesse linéaire est alors obtenue par intégration temporelle de cette accélération.

[0033] En variante, lorsque l'objet 12 est un véhicule à roues, l'organe d'acquisition 42 consiste en au moins deux odomètres chacun pour une roue du véhicule, par exemple les deux roues arrière. Par odomètre en entend un équipement capable de mesurer la vitesse d'une roue en comptant les tours (« compte-tours »). Généralement, les odomètres présentent une partie fixée à la roue (par exemple un aimant), et détectent chaque passage de cette partie fixée (appelé « top ») de sorte à compter le nombre de tours par unité de temps, qui est la fréquence de rotation. On connaît d'autres techniques, par exemple la détection optique d'une marque sur la roue, ou le magnétomètre du brevet FR 2 939 514 qui détecte la rotation d'un objet métallique tel qu'une roue. Ici la « vitesse » d'une roue est un scalaire, c'est-à-dire la norme de la vitesse de la roue dans le référentiel terrestre (dans l'hypothèse d'absence de dérapage). Si le rayon de la roue est connu, la mesure de la fréquence de rotation permet d'estimer cette norme de la vitesse.

[0034] Optionnellement, le capteur de mouvement 30 comprend encore un détecteur de foulée (non représenté) pour détecter lorsque le pied du piéton 12 est au sol, comme décrit par exemple dans le document WO 2017/060660.

[0035] Dans l'exemple représenté, l'unité de traitement 32 est constituée par une machine programmable, telle qu'un DSP (« *Digital Signal Processor* » en anglais) ou un microcontrôleur. Elle comprend un processeur ou CPU (« *Central Processing Unit* » en anglais) 44 et une mémoire 46 de type RAM (« *Random Access Memory* » en anglais) et/ou ROM (« *Read Only Memory* » en anglais). Le processeur 44 est configuré pour exécuter des instructions chargées dans la mémoire 46. Lorsque le système de navigation à l'estime 22 est mis sous tension, le processeur 44 est capable de lire dans la mémoire 46 des instructions et de les exécuter. Ces instructions forment un programme

d'ordinateur causant le calcul, par le processeur 44, du cap et de la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé, par exemple par la mise en œuvre du procédé décrit dans WO 2017/060660 ou FR 2 939 514.

[0036] En variante (non représentée), l'unité de traitement 32 est constituée par une machine ou un composant dédié, tel qu'un FPGA (« *Field-Programmable Gate Array* » en anglais) ou un ASIC (« *Application-Specific Integrated Circuit* » en anglais).

[0037] L'unité de traitement 32 comprend par ailleurs une mémoire tampon 49 pour le stockage temporaire d'informations nécessaires au calcul de la position du cap et de la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé.

[0038] Optionnellement, le système de navigation à l'estime 22 comprend également un réseau de magnétomètres 48 liés au boîtier 16, c'est-à-dire qu'ils présentent chacun un mouvement sensiblement identique à celui du boîtier 16 dans le référentiel terrestre, et espacés spatialement les uns des autres. Chaque magnétomètre 48 est un magnétomètre tri-axes propre à mesurer un champ magnétique selon trois axes. A cet effet, chaque magnétomètre 48 est typiquement constitué par trois magnétomètres mono-axe (non représentés) orientés selon des axes sensiblement perpendiculaires entre eux. Ces axes sont de préférence les mêmes que ceux du système de trois axes orthogonaux du gyromètre 40.

[0039] Le réseau de magnétomètres 48 est propre, du fait de sa géométrie particulière, à autoriser la détermination, à chaque instant de mesure des magnétomètres 48, d'un gradient spatial du champ magnétique mesuré, en particulier des coefficients de ce gradient selon chacun des axes du repère mobile lié au boîtier 16. Chaque coefficient dudit gradient est par exemple déterminé par une méthode utilisant les mesures vectorielles du champ magnétique réalisées par les magnétomètres 48, associée à des méthodes d'optimisation du type moindre carré ou filtre médian ou associée aux propriétés intrinsèques du champ magnétique décrites par les équations de Maxwell. Cependant toute autre méthode classique adaptée pour calculer les coefficients du gradient spatial du champ magnétique convient.

[0040] L'unité de traitement 32 est alors typiquement configurée pour ajuster la détermination de la vitesse du système de navigation à l'estime 22 par mise en œuvre du procédé décrit dans EP 2 541 199.

[0041] Le système de navigation à l'estime 22 a typiquement une précision de l'ordre de quelques pourcents, par exemple entre 1 et 3%, en distance parcourue et de quelques dizaines de degrés par heure, par exemple entre 30 et 80 degrés par heure, en dérive de cap.

[0042] Le système de positionnement relatif 24 est propre à identifier une position relative d'un point solidaire du système de navigation à l'estime 22 relativement à un système de référence ayant une position connue dans le repère fixe prédéterminé, et à en

déduire la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé. A cet effet, le système de positionnement relatif 24 comprend un capteur 50 propre à mesurer un paramètre permettant de localiser le point solidaire par rapport au système de référence, et une unité de traitement 52 pour déduire de ce paramètre une position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé.

[0043] De préférence, le système de positionnement relatif 24 est constitué par un système de multi-latération, en particulier par un système de multi-latération de proximité. L'infrastructure 18 comprend alors, au niveau du ou de chaque point d'accès 19, au moins trois balises 54 ([Fig.2]) (ou « ancres ») ayant chacune une position connue dans le repère fixe prédéterminé et avec lesquelles le système de positionnement relatif 24 est configuré pour communiquer. A cet effet, le capteur 50 est typiquement constitué par un système de communication sans fil propre à communiquer avec les balises 54 et à en déduire la distance avec chaque balise 54, par exemple par mesure de distance aller-retour (mieux connue sous l'acronyme « TWR », de l'anglais « two-way ranging »).

[0044] De préférence, le capteur 50 est constitué par un dispositif de télémétrie sur bande ultralarge propre à communiquer avec les balises 54 et à mesurer sa distance vis-à-vis des balises 54 via le protocole à bande ultralarge (mieux connu sous l'acronyme UWB, de l'anglais « Ultra Wide Band »), ce qui permet une précision dans la mesure de la position de l'ordre de la dizaine de centimètre, typiquement comprise entre 20 cm et 1 m. Comme connu de l'homme du métier, le protocole à bande ultralarge est un protocole de communication radio s'appuyant sur la transmission de très courtes impulsions (de l'ordre de la nanoseconde) sur un large spectre de fréquence. Les communications bénéficient ainsi d'une large bande passante (500 à 1350 MHz) dans la gamme 0,5 à 9,5 GHz (fréquence centrale) en fonction du canal utilisé. En variante, le capteur 50 est propre à communiquer avec les balises 54 via le protocole Bluetooth ou le protocole Wi-Fi.

[0045] En variante, le système de multi-latération est constitué par un système GNSS.

[0046] L'unité de traitement 52 est alors configurée pour déduire des mesures de distance et des positions connues des balises 54 la position relative du capteur 50 dans le repère fixe prédéterminé, typiquement par multi-latération ou par optimisation, et pour déduire de cette position, ainsi que de la position du capteur 50 par rapport au système de navigation à l'estime 22, la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé.

[0047] Selon un autre mode de réalisation (non représenté), le système de positionnement relatif 24 est constitué par un système de multi-angulation, le capteur 50 étant alors propre à mesurer au moins un angle entre les directions d'observation de deux balises ayant chacune une position connue dans le repère fixe prédéterminé. L'unité de

traitement 52 est alors configurée pour déduire de la ou des mesure(s) d'angle et de la position connue des balises 54 la position du capteur 50 dans le repère fixe prédéterminé, typiquement par multi-angulation, et pour déduire de cette position, et de la position du capteur 50 par rapport au système de navigation à l'estime 22, la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé.

[0048] Selon encore un autre mode de réalisation (non représenté), le système de positionnement relatif 24 est constitué par un système de mise en correspondance de carte. Le capteur 50 est alors propre à mesurer un paramètre de l'environnement, par exemple le relief ou le champ magnétique, et l'unité de traitement 52 est propre à mettre cette mesure en correspondance avec une carte dudit paramètre qu'elle stocke en mémoire, de manière à en déduire la position du capteur 50 dans le repère fixe prédéterminé.

[0049] Selon un quatrième mode de réalisation (non représenté), le système de positionnement relatif 24 est constitué par un système de positionnement visuel. Le capteur 50 est alors constitué par un imageur associé à un système de traitement d'image. L'imageur est configuré pour acquérir des images de l'environnement et le système de traitement pour détecter dans chaque image un point remarquable, par exemple une mire, dont la position est connue dans le repère fixe prédéterminé. L'unité de traitement 52 est alors configurée pour en déduire une position relative du capteur par rapport au point remarquable, et pour déduire de cette position relative, ainsi que de la position connue du point remarquable et de la position du capteur 50 par rapport au système de navigation à l'estime 22, la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé.

[0050] En variante (non représentée), l'imageur est fixe (il appartient à l'infrastructure 18) et c'est le point remarquable (typiquement la mire) qui est porté par le boîtier 16. En variante encore, on peut prévoir une configuration de capture de mouvement (« motion capture » en anglais) dans laquelle plusieurs cibles sont portées par le boîtier 16 et détectées par un imageur fixe.

[0051] Dans l'exemple représenté, l'unité de traitement 52 est constituée par une machine programmable, telle qu'un DSP (« *Digital Signal Processor* » en anglais) ou un microcontrôleur. Elle comprend un processeur ou CPU (« *Central Processing Unit* » en anglais) 56 et une mémoire 58 de type RAM (« *Random Access Memory* » en anglais) et/ou ROM (« *Read Only Memory* » en anglais). Le processeur 56 est configuré pour exécuter des instructions chargées dans la mémoire 58. Lorsque le système de positionnement relatif 24 est mis sous tension, le processeur 56 est capable de lire dans la mémoire 58 des instructions et de les exécuter. Ces instructions forment un programme d'ordinateur causant le calcul, par le processeur 56, de la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé à partir du paramètre mesuré

par le capteur 50.

[0052] En variante (non représentée), l'unité de traitement 52 est constituée par une machine ou un composant dédié, tel qu'un FPGA (« *Field-Programmable Gate Array* » en anglais) ou un ASIC (« *Application-Specific Integrated Circuit* » en anglais).

[0053] Dans l'exemple représenté l'unité de traitement 52 du système de positionnement relatif 24 est distincte de celle 32 du système de navigation à l'estime 22. En variante (non représentée) ces unités de traitement 32, 52 sont confondues.

[0054] Le système de communication 26 est configuré pour mettre en œuvre une communication sans fil à courte portée par exemple Bluetooth ou Wi-Fi (en particulier dans un mode de réalisation avec un terminal mobile 29) et/ou pour se connecter à un réseau mobile (typiquement UMTS/LTE/5G) pour une communication à longue distance. En variante (non représentée), le système de communication 26 est par exemple une connectique filaire (typiquement USB) pour transférer les données du module de stockage 28 à un autre module de stockage, typiquement du terminal mobile 29.

[0055] Par exemple le système de communication 26 est configuré pour envoyer la position calculée par le système de navigation à l'estime 22 au terminal mobile 29 pour affichage de la position par le terminal mobile 29 dans une interface d'un logiciel de navigation.

[0056] Dans les exemples décrits ci-dessus, les unités de traitement 32, 52 du système de navigation à l'estime 22 et du système de positionnement relatif 24 sont intégrées au boîtier 16. En variante (non représentée), au moins une partie de ces unités de traitement 32, 52 est déportée, par exemple dans le terminal mobile 29, dans l'infrastructure 18 et/ou dans un serveur distant (non représenté). En d'autres termes, au moins une partie étapes de calcul de la position du système de navigation à l'estime 22 par le système de navigation à l'estime 22 ou par le système de positionnement relatif 24 est effectuée par le terminal mobile 29, l'infrastructure 18 et/ou un serveur distant. Le système de communication 26 est alors configuré pour envoyer au terminal mobile 29, à l'infrastructure 18 et/ou au serveur distant les données du capteur de mouvement 30 et/ou du capteur 50. Avantageusement, le système de communication 26 est également configuré pour recevoir du terminal mobile 29, de l'infrastructure 18 et/ou du serveur distant la position du système de navigation à l'estime 22 calculée par le système de navigation à l'estime 22 ou par le système de positionnement relatif 24.

[0057] De retour aux Figures 1 et 2, l'infrastructure 18 comprend, comme décrit plus haut, une pluralité de balises 54 disposées au niveau des points d'accès 19 à l'espace prédéfini 14. Ces balises 54 sont typiquement regroupées au sein de portails agencés au niveau des points d'accès 19, comme le portail 60 représenté sur la [Fig.2]. Chaque portail 60 inclut un minimum de trois balises 54 de manière à permettre le positionnement des piétons 12 franchissant le point d'accès 19 par multi-latération.

[0058] L'infrastructure 18 est par exemple une infrastructure fixe pérenne. C'est notamment le cas lorsque l'espace prédéfini 14 est un site industriel et que le système de localisation 10 est destiné à suivre le déplacement des techniciens sur ledit site. En variante, l'architecture 18 est une infrastructure fixe temporaire. C'est par exemple le cas lorsque l'espace prédéfini 14 est un site d'intervention notamment en cas d'incendie : l'infrastructure 18 est alors apportée et installée à l'un des points d'accès du site d'intervention avant l'arrivée des pompiers. En variante encore, l'infrastructure 18 est une infrastructure mobile. Elle est typiquement embarquée à bord d'un véhicule (non représenté) utilisé pour l'acheminement des piétons 12 dont on souhaite suivre le déplacement jusqu'à l'espace prédéfini 14. Ce véhicule est alors lui-même équipé d'un système de localisation et d'orientation permettant de calculer la position de l'infrastructure 18 dans le repère prédéterminé. C'est par exemple le cas lorsque l'espace prédéfini 14 est un site d'intervention notamment en cas de prise d'otage.

[0059] Un procédé 100 mis en œuvre par le système de localisation 10, plus particulièrement par les unités de traitement 32, 52, va maintenant être décrit, en référence aux Figures 4 à 6.

[0060] Comme visible sur la [Fig.4], le procédé 100 débute par une première étape 102 de démarrage du système de localisation à l'estime 22. Cette première étape 102 est typiquement mise en œuvre alors que le piéton 12 porteur du boîtier 16 est encore hors de l'espace prédéfini 14. Typiquement, l'étape 102 est enclenchée par l'appui, par le piéton 12, sur un bouton (non représenté) du boîtier 16. Le système de positionnement relatif 24 démarre typiquement concomitamment à l'étape 102.

[0061] Après son démarrage, le système de localisation à l'estime 22 fournit une position $v(t) = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{pmatrix}$ du piéton 12 dans un repère fixe arbitraire. Cette position v(t) est affectée d'une erreur aléatoire. Par simplification, cette erreur aléatoire est ici assimilée à une variable gaussienne centrée de variance $\Gamma_v = \begin{pmatrix} Var(v_1) & Covar(v_1, v_2) \\ Covar(v_2, v_1) & Var(v_2) \end{pmatrix}$.

Par simplification encore, on émet dans la suite l'hypothèse qu'il n'y a aucune corrélation spatiale entre les directions du plan, c'est-à-dire que les termes $Covar(v_1, v_2)$ et $Covar(v_2, v_1)$ sont nuls. Par simplification toujours, on considère dans la suite que les termes $Var(v_1)$ et $Var(v_2)$ sont égaux, de sorte que la variance Γ_v peut s'écrire $\sigma_v^2(t) \times I_2$, où $\sigma_v(t)$ reflète une incertitude sur la position v(t) et I_2 est la matrice identité de dimension 2. Si cette incertitude $\sigma_v(t)$ est a priori variable dans le temps, l'amplitude de cette variation est généralement assez faible. Il est donc considéré, ici et dans la suite, une incertitude σ_v constante.

[0062] Le système de localisation à l'estime 22 fournit également un cap $\psi(t)$ du piéton 12 dans ledit repère fixe arbitraire. Ce repère fixe arbitraire est un repère bidimensionnel horizontal qui consiste typiquement en une rotation du repère fixe prédéterminé d'un angle θ autour de l'axe vertical et d'une translation d'un vecteur Δ horizontal. Le repère fixe arbitraire partage ainsi un axe commun avec le repère fixe prédéterminé, constitué par l'axe vertical. Il est choisi arbitrairement par le système de localisation à l'estime 22 en fonction de son orientation au démarrage.

[0063] Le système de positionnement relatif 24 fournit quant à lui une position horizontale $u(t) = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}$ du piéton 12 dans le repère fixe prédéterminé. Cette position u(t) est affectée d'une erreur aléatoire. Par simplification, cette erreur aléatoire est ici assimilée à une variable gaussienne centrée de variance $\Gamma_u = \begin{pmatrix} Var(u_1) & Covar(u_1, u_2) \\ Covar(u_2, u_1) & Var(u_2) \end{pmatrix}$. Par simplification encore, on émet dans la suite l'hypothèse qu'il n'y a aucune corrélation spatiale entre les directions du plan, c'est-à-dire que les termes $Covar(u_1, u_2)$ et $Covar(u_2, u_1)$ sont nuls. Par simplification toujours, on considère dans la suite que les termes $Var(u_1)$ et $Var(u_2)$ sont égaux, de sorte que la variance Γ_u peut s'écrire $\sigma_u^2(t) \times I_2$, où $\sigma_u(t)$ reflète une incertitude sur la position u(t) et I_2 est la matrice identité de dimension 2. Si cette incertitude $\sigma_u(t)$ est a priori variable dans le temps, l'amplitude de cette variation est généralement assez faible. Il est donc considéré, ici et dans la suite, une incertitude σ_u constante.

[0064] L'étape 102 est suivie d'une étape 104 de détermination de la possibilité, pour le système de positionnement relatif 24, d'évaluer la position du système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe prédéterminé. Si la détermination est positive, c'est-à-dire typiquement si le boîtier 16 est à portée des balises 54 de l'infrastructure 18, l'étape 104 est suivie d'une étape 106 de recalage du système de navigation à l'estime 22 en position et d'une étape 107 de recalage du système de navigation à l'estime 22 en cap. Si la détermination est négative, c'est-à-dire typiquement si le boîtier 16 est hors de portée des balises 54 de l'infrastructure 18, l'étape 104 est répétée après une temporisation.

[0065] Lors de l'étape de recalage en position 106, le système de navigation à l'estime 22 estime la position $v(t_0)$ du piéton 12 dans le repère fixe arbitraire à un instant t_0 pendant que le système de positionnement relatif 24 évalue la position du piéton $u(t_0)$ dans le repère fixe prédéterminé audit instant t_0 et communique cette position évaluée $u(t_0)$ au système de navigation à l'estime 22. Le système de navigation à l'estime 22 détermine ensuite un paramètre de recalage en position δ constitué par la différence entre les positions évaluée $u(t_0)$ et estimée $v(t_0)$: $\Delta = v(t_0) - u(t_0)$. Le système de navigation

à l'estime 22 ajuste alors la position estimée en appliquant ledit paramètre de recalage en position Δ : $\hat{v}(t) = v(t) - \Delta$.

[0066] En référence à la [Fig.5], le recalage en cap 107 débute par le déplacement 110 du piéton 12 suivant une trajectoire de déplacement durant un intervalle de déplacement pendant que le boîtier 16 est à portée des balises 54 de l'infrastructure 18.

[0067] Durant ce déplacement 110, le recalage en cap 107 comprend, pour une pluralité d'instants d'évaluation i_k compris dans l'intervalle de déplacement, une évaluation 112 de la position $u(i_k)$ du piéton 12 par le système de positionnement relatif 24 dans le repère fixe prédéterminé audit instant d'évaluation i_k. Cette évaluation 112 est suivie de la réception 114 de cette position évaluée $u(i_k)$ par le système de navigation à l'estime 22.

[0068] En parallèle, le recalage en cap 107 comprend également, pour une pluralité d'instants d'estimation τ_k compris dans l'intervalle de déplacement, une estimation 116 de la position $v(\tau_k)$ du piéton 12 par le système de navigation à l'estime 22 dans le repère fixe arbitraire audit instant d'estimation τ_k.

[0069] Les étapes de réception 114 et d'estimation 116 sont suivies d'une étape 118 de mise en correspondance des positions évaluée $u(i_k)$ et estimée $v(\tau_k)$ par le système de navigation à l'estime 22. En effet, l'étape de recalage 107 repose sur l'exploitation de positions évaluées synchrones de positions estimées. Or, ces deux types de positions provenant d'origines différentes, les instants d'évaluation i_k diffèrent généralement des instants d'estimation τ_k. Une mise en correspondance est donc nécessaire entre les positions évaluée $u(i_k)$ et estimée $v(\tau_k)$. Cette mise en correspondance vise à associer et synchroniser les positions évaluée $u(i_k)$ et estimée $v(\tau_k)$, afin de pouvoir disposer, pour chacun d'une pluralité d'instants de détermination t_k, d'un couple de position évaluée $u(t_k)$ et de position estimée $v(t_k)$ audit instant de détermination t_k. Cette mise en correspondance consiste donc à déduire de l'ensemble $\{u(i_k)\}_k$ des positions évaluées $u(i_k)$ aux instants d'évaluation i_k et de l'ensemble $\{v(\tau_k)\}_k$ des positions estimées $v(\tau_k)$ aux instants d'estimation τ_k :

[0070]
- un ensemble $\{u(t_k)\}_k$ de positions évaluées $u(t_k)$ aux instants de détermination t_k, et
- un ensemble $\{v(t_k)\}_k$ de positions estimées $v(t_k)$ aux instants de détermination t_k,

[0071] A cette fin, la mise en correspondance comprend par exemple l'interpolation d'au moins un ensemble ou sous-ensemble parmi :

[0072]
- l'ensemble $\{u(i_k)\}_k$ des positions évaluées $u(i_k)$ aux instants d'évaluation i_k, et
- l'ensemble $\{v(\tau_k)\}_k$ des positions estimées $v(\tau_k)$ aux instants d'estimation τ_k.

[0073] Cette interpolation utilise de préférence des splines temporelles. De préférence, les splines utilisées pour l'interpolation sont dérivables au moins deux fois. La repré-

sentation en spline permet notamment de forcer la continuité de la trajectoire. La représentation en spline permet également d'optimiser les différents paramètres intervenants, en particulier les paramètres de synchronisation temporelle, à l'aide d'une méthode basée sur le gradient d'un critère à minimiser. En variante, l'interpolation utilise une autre approche, comme par exemple une représentation discrète de la trajectoire parcourue le piéton 12.

[0074] De préférence, seul l'ensemble des positions estimées $\{v(\tau_k)\}_k$ est interpolé, les instants de détermination t_k étant choisi comme étant égaux aux instants d'évaluation i_k : $t_k = i_k$. L'ensemble $\{u(t_k)\}_k$ de positions évaluées $u(t_k)$ aux instants de détermination t_k est donc confondu avec l'ensemble $\{u(i_k)\}_k$ des positions évaluées $u(i_k)$ aux instants d'évaluation i_k. La réception 114 par le système de navigation à l'estime 22 d'une position évaluée $u(i_k)$ à un instant d'évaluation i_k constitue ainsi une étape d'obtention, par le système de navigation à l'estime 22, d'une position évaluée $u(t_k)$ du piéton 12 à un instant de détermination t_k.

[0075] En variante, seul l'ensemble des positions évaluées $\{u(t_k)\}_k$ est interpolé, les instants de détermination t_k étant choisi comme étant égaux aux instants d'estimation τ_k : $t_k = \tau_k$. La mise en correspondance 118 constitue ainsi une étape d'obtention, par le système de navigation à l'estime 22, d'une position évaluée $u(t_k)$ du piéton 12 à un instant de détermination t_k.

[0076] Il est à noter que dans le cas où les instants d'évaluation i_k correspondent aux instants d'évaluation τ_k, la mise en correspondance 118 se borne à associer les positions évaluées $u(i_k)$ et estimées $v(\tau_k)$ aux mêmes instants i_k, τ_k, qui deviennent alors des instants de détermination t_k.

[0077] La mise en correspondance 118 est suivi de l'ajout 120 du couple de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ ainsi mises en correspondance dans la mémoire tampon 49 puis du nettoyage 122 de la mémoire tampon 49. Ce nettoyage 122 consiste en la suppression de la mémoire tampon 49 de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ associés à des instants de détermination t_k qui ne sont plus dans l'intervalle de déplacement, l'intervalle de déplacement étant ici compris comme une fenêtre temporelle glissante, de durée prédéterminée, s'achevant à la date de l'instant d'évaluation i_k ou d'estimation τ_k le plus récent.

[0078] A ces étapes 120, 122 succède une étape 124 de déduction d'un paramètre θ de recalage de cap. Ce paramètre de recalage de cap θ est ici constitué par un paramètre, en particulier un angle, de modification d'orientation par rotation autour d'un axe du repère prédéterminé, ici l'axe vertical. Optionnellement, le recalage de cap 107 comprend également, parallèlement à l'étape 124, d'autres étapes (non représentées) de déduction d'autres paramètres de recalage de cap, par exemple un paramètre de correction d'un biais en variation angulaire de la trajectoire.

[0079] En référence à la Figure 6, cette étape 124 comprend une première sous-étape 130 de

calcul d'une première valeur candidate θ_1 pour le paramètre de recalage de cap θ avec tous les points, c'est-à-dire tous les couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$, contenus dans la mémoire tampon 49. Cette première valeur candidate θ_1 est calculée par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions $u(t_k)$ évaluées aux N instants de détermination t_k correspondant aux couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49 aux positions estimées $v(t_k)$ pour lesdits N instants de détermination t_k corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ et du paramètre de recalage en position Δ. Cette fonction de coût est en particulier représentative d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées $\{u_k\}_k$ et les positions estimées $\{v_k\}_k$ après application aux positions évaluées $\{u_k\}_k$ d'une transformation géométrique comprenant :

[0080]
- une rotation autour d'un axe du repère prédéterminé, ici l'axe vertical, d'un angle égal au paramètre de recalage de cap θ, et
- une translation suivant une direction orthogonale audit axe d'un vecteur égal au paramètre de recalage de position Δ.

[0081] Ainsi, la fonction de coût est par exemple égale à

$I(\theta, \Delta) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N} \| v_k - R(\theta) u_k - \Delta \|^2$, où :

[0082]
- $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination ;
- $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination ;
- $\{t_k\}_k$ est l'ensemble des instants de détermination ;
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49 ;
- θ est le paramètre de recalage de cap ;
- $R(\theta)$ est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application du paramètre de recalage de cap ; et
- Δ est le paramètre de recalage de position.

[0083] La première valeur candidate θ_1 est ainsi égale à

$$\operatorname{atan2}\left(\sum_{k=1}^{N}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)-(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1),\ \sum_{k=1}^{N}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)+(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)\right)$$

, où :

[0084]
- $u_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{u}_1$ est une moyenne de la première coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$;

- $u_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{u}_2$ est une moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$;
- $v_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{v}_1$ est une moyenne de la première coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$;
- $v_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{v}_2$ est une moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$; et
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49.

[0085] En variante (non représentée), la fonction de coût comprend une pondération des différents termes de la somme $\sum_{k=1}^{N} \| v_k - R(\theta) u_k - \Delta \|^2$, par exemple en fonction de la vraisemblance desdits termes (typiquement les termes associés à des variances plus élevées se verraient attribuer un poids plus faible) ou de la distance géométrique entre les différents termes (typiquement les termes géométriquement proches les uns des autres se verraient attribuer un poids plus faible). En variante encore, la transformation géométrique est appliquée aux positions estimées $\{v_k\}_k$ et non aux positions évaluées $\{u_k\}_k$: les termes de la somme s'écrivent alors $\| u_k - R(\theta) v_k - \Delta \|^2$. En variante toujours, la transformation géométrique comprend également :

[0086]
- un redressement de trajectoire, paramétrisée par un paramètre b de correction d'un biais en variation angulaire de la trajectoire : les termes de la somme s'écrivent alors $\| v_k - R(\theta + b \times t_k) u_k - \Delta \|^2$;

  et/ou
- une homothétie, paramétrisée par un facteur d'échelle h : les termes de la somme s'écrivent alors $\| v_k - h \times (R(\theta) u_k + \Delta) \|^2$.

[0087] Cette sous-étape 130 est suivie d'une sous-étape 132 d'évaluation d'une première valeur de précision σ_{01} associée à ladite première valeur candidate θ_1. Cette première valeur de précision σ_{01} est par exemple fonction des incertitudes σ_v, σ_u sur les positions estimées $\{v_k\}_k$ et les positions évaluées $\{u_k\}_k$. Elle est typiquement constituée par l'écart-type de la première valeur candidate θ_1 et est donnée par la formule suivante :

[0088] $$\sigma_{\theta 1}=\sqrt{\frac{\left(1-\frac{1}{N}\right)\times\left(\sigma_v^2\sum_{k=1}^{N}\|u_k-\bar{u}\|^2+\sigma_u^2\sum_{k=1}^{N}\|v_k-\bar{v}\|^2\right)}{\left\|\sum_{k=1}^{N}\begin{bmatrix}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)+(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)\\(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)-(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)\end{bmatrix}\right\|^2}}$$, où :

[0089] – $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination,

[0090] – $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination,

– $\{t_k\}_k$ est l'ensemble des instants de détermination,

– σ_u^2 est la variance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position évaluée par le système de positionnement relatif 24,

– σ_v^2 est la covariance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position estimée par le système de navigation à l'estime 22,

– $u_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $u_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $v_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $v_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $\bar{u}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,

– $\bar{u}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,

– $\bar{v}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de déter-

mination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,

- $\bar{v}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$, et
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49.

[0091] En variante, la première valeur de précision σ_{01} est fonction d'un écart moyen observé entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ ayant la première valeur candidate θ_1. Elle est par exemple donnée par la formule suivante :

[0092] $\sigma_{\theta 1} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N} \left\| (v_k - \bar{v}) - R(\theta_1) \times (u_k - \bar{u}) \right\|^2}{\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N} \|u_k - \bar{u}\|^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N} \|v_k - \bar{v}\|^2}}$, où :

[0093]
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49,
- $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination ;
- $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination ;
- $\bar{u}$ est la moyenne de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- $\bar{v}$ est la moyenne de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- θ_1 est le paramètre de recalage en cap affecté de la première valeur candidate θ_1, et
- $R(\theta_1)$ est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application du paramètre de recalage de cap.

[0094] En variante, la première valeur de précision σ_{01} est une combinaison d'une fonction des incertitudes σ_v, σ_u sur les positions estimées $\{v_k\}_k$ et les positions évaluées $\{u_k\}_k$ et d'une fonction d'un écart moyen observé entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ ayant la première valeur candidate θ_1.

[0095] Parallèlement aux sous-étapes 130, 132, l'étape de déduction 124 comprend également une sous-étape 134 de calcul d'une deuxième valeur candidate θ_2 pour le paramètre de recalage de cap θ sans le point le plus ancien contenu dans la mémoire tampon 49, c'est-à-dire avec tous les couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ contenus dans la mémoire tampon 49 sauf le couple de positions $u(t_1)$, $v(t_1)$ associé à l'instant de déter-

mination t_1 le plus ancien. Cette deuxième valeur candidate θ_2 est calculée par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions $u(t_k)$ évaluées aux N-1 instants de détermination t_k correspondant aux couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ les plus récents compris dans la mémoire tampon 49 aux positions estimées $v(t_k)$ pour lesdits N-1 instants de détermination t_k corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ et du paramètre de recalage en position Δ. Cette fonction de coût est en particulier représentative d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées $\{u_k\}_k$ et les positions estimées $\{v_k\}_k$ après application aux positions évaluées $\{u_k\}_k$ d'une transformation géométrique comprenant :

[0096]
- une rotation autour d'un axe du repère prédéterminé, ici l'axe vertical, d'un angle égal au paramètre de recalage de cap θ, et
- une translation suivant une direction orthogonale audit axe d'un vecteur égal au paramètre de recalage de position Δ.

[0097] Ainsi, la fonction de coût est par exemple égale à

$I(\theta, \Delta) = \frac{1}{2}\sum_{k=2}^{N} \| v_k - R(\theta)u_k - \Delta \|^2$, où :

[0098]
- $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination ;
- $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination ;
- $\{t_k\}_k$ est l'ensemble des instants de détermination ;
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49 ;
- θ est le paramètre de recalage de cap ;
- $R(\theta)$ est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application du paramètre de recalage de cap ; et
- Δ est le paramètre de recalage de position.

[0099] La deuxième valeur candidate θ_2 est ainsi égale à

$$\operatorname{atan2}\left(\sum_{k=2}^{N}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)-(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1),\ \sum_{k=2}^{N}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)+(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)\right)$$

, où :

[0100]
- $u_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{u}_1$ est une moyenne de la première coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$;
- $u_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à

l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;

- $\bar{u}_2$ est une moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$;
- $v_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{v}_1$ est une moyenne de la première coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$;
- $v_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k ;
- $\bar{v}_2$ est une moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$; et
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49.

[0101] En variante (non représentée), la fonction de coût comprend une pondération des différents termes de la somme $\sum_{k=2}^{N} \| v_k - R(\theta) u_k - \Delta \|^2$, par exemple en fonction de la vraisemblance desdits termes (typiquement les termes associés à des variances plus élevées se verraient attribuer un poids plus faible) ou de la distance géométrique entre les différents termes (typiquement les termes géométriquement proches les uns des autres se verraient attribuer un poids plus faible). En variante encore, la transformation géométrique est appliquée aux positions estimées $\{v_k\}_k$ et non aux positions évaluées $\{u_k\}_k$: les termes de la somme s'écrivent alors $\| u_k - R(\theta) v_k - \Delta \|^2$. En variante toujours, la transformation géométrique comprend également :

[0102] – un redressement de trajectoire, paramétrisée par un paramètre b de correction d'un biais en variation angulaire de la trajectoire : les termes de la somme s'écrivent alors $\| v_k - R(\theta + b \times t_k) u_k - \Delta \|^2$;

et/ou

– une homothétie, paramétrisée par un facteur d'échelle h : les termes de la somme s'écrivent alors $\| v_k - h \times (R(\theta) u_k + \Delta) \|^2$.

[0103] Cette sous-étape 134 est suivie d'une sous-étape 136 d'évaluation d'une deuxième valeur de précision σ_{02} associée à ladite deuxième valeur candidate θ_2. Cette deuxième valeur de précision σ_{02} est par exemple fonction des incertitudes σ_v, σ_u sur les positions estimées $\{v_k\}_k$ les positions évaluées $\{u_k\}_k$. Elle est typiquement constituée par l'écart-type de la deuxième valeur candidate θ_2 et est donnée par la formule suivante :

[0104] $$\sigma_{\theta 2}=\sqrt{\frac{\left(1-\frac{1}{N}\right)\times\left(\sigma_v^2\sum_{k=2}^{N}\left\|u_k-\bar{u}\right\|^2+\sigma_u^2\sum_{k=2}^{N}\left\|v_k-\bar{u}\right\|^2\right)}{\left\|\sum_{k=2}^{N}\begin{bmatrix}(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)+(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)\\(u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)-(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)\end{bmatrix}\right\|^2}}$$, où :

[0105] – $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination,

[0106] – $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination,

– $\{t_k\}_k$ est l'ensemble des instants de détermination,

– σ_u^2 est la covariance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position évaluée par le système de positionnement relatif 24,

– σ_v^2 est la covariance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position estimée par le système de navigation à l'estime 22,

– $u_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $u_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $v_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $v_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

– $\bar{u}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$,

– $\bar{u}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$,

– $\bar{v}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de déter-

mination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$,

- $\bar{v}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$, et
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49.

[0107] En variante, la deuxième valeur de précision σ_{02} est fonction d'un écart moyen observé entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ ayant la deuxième valeur candidate θ_2. Elle est par exemple donnée par la formule suivante :

[0108] $$\sigma_{\theta 2} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{N} \left\| (v_k - \bar{v}) - R(\theta_2) \times (u_k - \bar{u}) \right\|^2}{\frac{1}{2}\sum_{k=2}^{N} \left\| u_k - \bar{u} \right\|^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=2}^{N} \left\| v_k - \bar{v} \right\|^2}}$$, où :

[0109]
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49,
- $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination ;
- $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination ;
- $\bar{u}$ est la moyenne de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$,
- $\bar{v}$ est la moyenne de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination à l'exception du plus ancien $\{t_k\}_{k=2}^{N}$,
- θ_2 est le paramètre de recalage en cap affecté de la deuxième valeur candidate θ_2, et
- $R(\theta_2)$ est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application du paramètre de recalage de cap.

[0110] En variante, la première valeur de précision σ_{02} est une combinaison d'une fonction des incertitudes σ_v, σ_u sur les positions estimées $\{v_k\}_k$ et les positions évaluées $\{u_k\}_k$ et d'une fonction d'un écart moyen observé entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ ayant la première valeur candidate θ_2.

[0111] Les sous-étapes 132 et 136 sont suivies d'une sous-étape 140 de comparaison de la première valeur de précision σ_{01} avec la deuxième valeur de précision σ_{02}.

[0112] Si la première valeur de précision σ_{01} reflète une meilleure précision que la deuxième

valeur σ_{02}, c'est-à-dire ici si $\sigma_{01}<\sigma_{02}$, alors l'étape 140 est suivie d'une étape 142 de sélection de la première valeur candidate θ_1 comme valeur candidate sélectionnée.

[0113] Si en revanche la valeur de précision reflétant la meilleure précision est constituée par la deuxième valeur de précision σ_{02}, c'est-à-dire ici si $\sigma_{01}>\sigma_{02}$, alors l'étape 140 est suivie d'une étape 144 de suppression du point le plus ancien de la mémoire tampon 49, c'est-à-dire du couple de positions $u(t_1)$, $v(t_1)$ associé à l'instant de détermination t_1 le plus ancien. Les instants de détermination restant $\{t_k\}_{k=2}^{N}$ sont alors renumérotés en $\{t_k\}_{k=1}^{N-1}$ et les étapes 130 à 140 sont répétées.

[0114] Cela permet de maximiser la précision du paramètre de recalage θ.

[0115] La sous-étape 142 est optionnellement suivie d'un ensemble de sous-étapes 150 à 154 visant à valider le nouveau paramètre de recalage θ à partir d'un calcul de résidu.

[0116] La sous-étape 142 est alors suivie d'une sous-étape 150 de calcul d'un résidu de recalage attendu r^{exp}. Ce résidu de recalage est destiné à refléter l'écart moyen attendu entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ. Il est donné par la formule suivante :

$$r^{exp} = 2\left(1-\frac{1}{N}\right)\left(\sigma_u^2+\sigma_v^2\right)+\frac{\sigma_\theta^2}{N}\left\| \sum_{k=1}^{N}\begin{bmatrix} (u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1)+(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2) \\ (u_1(t_k)-\bar{u}_1)\times(v_2(t_k)-\bar{v}_2)-(u_2(t_k)-\bar{u}_2)\times(v_1(t_k)-\bar{v}_1) \end{bmatrix}\right\|$$

, où :

[0117]
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49,
- σ_u^2 est la covariance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position évaluée par le système de positionnement relatif 24,
- σ_v^2 est la covariance de l'erreur aléatoire affectant chaque coordonnée de la position estimée par le système de navigation à l'estime 22,
- σ_θ^2 est la covariance du paramètre de recalage θ, égale au carré de l'écart-type σ_{01}, discuté ci-dessus, de la valeur candidate sélectionnée θ_1,
- $u_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,
- $u_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe prédéterminé, de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,
- $v_1(t_k)$ est une première coordonnée de position, selon un premier axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,

- $v_2(t_k)$ est une deuxième coordonnée de position, selon un deuxième axe du repère fixe arbitraire, de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 à un instant de détermination t_k,
- $\bar{u}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- $\bar{u}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- $\bar{v}_1$ est la moyenne de la première coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$, et
- $\bar{v}_2$ est la moyenne de la deuxième coordonnée de position de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$.

[0118] La sous-étape 150 est suivie d'une sous-étape 152 de calcul d'un résidu de recalage observé r^{obs}. Ce résidu de recalage est destiné à refléter l'écart moyen observé entre l'ensemble des positions évaluées $\{u_k\}_k$ et l'ensemble des positions estimées $\{v_k\}_k$ associées, corrigées au moyen du paramètre de recalage en cap θ affecté de la valeur candidate sélectionnée θ_1. Il est donné par la formule suivante :

[0119] $$r^{obs} = \frac{1}{N}\sum_k \left\| (v_k - \bar{v}) - R(\theta) \times (u_k - \bar{u}) \right\|^2$$, où :

[0120]
- N est le nombre de couples de positions $u(t_k)$, $v(t_k)$ compris dans la mémoire tampon 49,
- $\{u_k\}_k$ est l'ensemble des positions évaluées aux instants de détermination ;
- $\{v_k\}_k$ est l'ensemble des positions estimées aux instants de détermination ;
- $\bar{u}$ est la moyenne de la position évaluée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- $\bar{v}$ est la moyenne de la position estimée du système de navigation à l'estime 22 sur l'ensemble des instants de détermination $\{t_k\}_{k=1}^{N}$,
- θ est le paramètre de recalage en cap, et
- R(θ) est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application du paramètre de recalage de cap.

[0121] A la sous-étape 152 succède une sous-étape 154 de comparaison du résidu de

recalage observé r^{obs} avec le résidu de recalage attendu r^{exp}, augmenté d'un seuil δ prédéterminé.

[0122] Si le résidu de recalage observé r^{obs} est strictement supérieur à la somme du résidu de recalage attendu r^{exp} avec le seuil δ, c'est-à-dire si l'inégalité $r^{obs} > r^{exp} + \delta$ est vérifiée, alors la sous-étape 154 est suivie d'une sous-étape 156 de rejet de la valeur candidate sélectionnée. Le paramètre de recalage θ conserve alors sa valeur antérieure.

[0123] Si le résidu de recalage observé r^{obs} est inférieur ou égal à la somme du résidu de recalage attendu r^{exp} avec le seuil δ, c'est-à-dire si l'inégalité $r^{obs} \leq r^{exp} + \delta$ est vérifiée, alors la sous-étape 154 est suivie d'une sous-étape 158 de comparaison de la valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée avec une valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à une valeur courante du paramètre de recalage θ. On notera que, compte-tenu de l'algorithme de sélection de la valeur candidate, valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée est égale à la première valeur de précision $\sigma_{\theta 1}$ décrite ci-dessus.

[0124] Plus précisément, la sous-étape 158 comprend la comparaison de la valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée avec la valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à la valeur courante du paramètre de recalage θ augmentée d'une valeur de dérive temporelle proportionnelle au temps écoulé entre la détermination de la valeur candidate sélectionnée et la détermination de la valeur courante du paramètre de recalage de cap θ. Cette valeur de dérive temporelle est typiquement égale à $(t_n - t_o) \times b$, où :

[0125]
- t_n est un instant représentatif des instants de détermination $\{t_k\}_k$ pris en considération pour la détermination de la valeur candidate sélectionnée,
- t_o est un instant représentatif des instants de détermination $\{t_k\}_k$ pris en considération pour la détermination de la valeur courante du paramètre de recalage de cap θ, et
- b est une constante prédéfinie représentant une valeur typique de biais du gyromètre 40.

[0126] Chacun des instants t_o, t_n est par exemple constitué par la moyenne des instants de détermination $\{t_k\}_k$ pris en considération pour la détermination de la valeur candidate sélectionnée, respectivement pour la détermination de la valeur courante du paramètre de recalage de cap θ. En variante, chacun des instants t_o, t_n est par exemple constitué par l'instant de détermination t_k le plus récent pris en considération pour la détermination de la valeur candidate sélectionnée, respectivement pour la détermination de la valeur courante du paramètre de recalage de cap θ.

[0127] Dans le cas où la sous-étape 158 est mise en œuvre pour la première fois depuis le démarrage du système de navigation à l'estime 22, la valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à la valeur courante du paramètre de recalage θ est de préférence infinie.

[0128] La sous-étape 158 est suivie d'une sous-étape 160 de détermination d'une valeur future du paramètre de recalage θ en fonction du résultat de la comparaison 158. Cette valeur future est typiquement fonction de la valeur candidate et de la valeur courante.

[0129] Par exemple, si la valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée est supérieure ou égale à la valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à la valeur courante augmentée de la valeur de dérive temporelle, c'est-à-dire si l'inégalité suivante est vérifiée : $\sigma_{\theta n} \geq \sigma_{\theta o} + (t_n - t_o) \times b$, alors la valeur future est égale à la valeur courante, et si en revanche la valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée est strictement inférieure à la valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à la valeur courante augmentée de la valeur de dérive temporelle, c'est-à-dire si l'inégalité suivante est vérifiée : $\sigma_{\theta n} < \sigma_{\theta o} + (t_n - t_o) \times b$, alors la valeur future est égale à la valeur candidate sélectionnée.

[0130] En variante, la valeur future est égale à une combinaison de la valeur candidate sélectionnée et de la valeur courante fonction du rapport entre la valeur de précision $\sigma_{\theta n}$ associée à la valeur candidate sélectionnée et la valeur de précision $\sigma_{\theta o}$ associée à la valeur courante augmentée de la valeur de dérive temporelle, typiquement par application d'un filtre de Kalman ou d'une fusion bayésienne. Par exemple la valeur future est égale à $\theta_n \times \frac{(\sigma_{\theta o}+(t_n-t_o)\times b)^2}{\sigma_{\theta n}^2+(\sigma_{\theta o}+(t_n-t_o)\times b)^2} + \theta_o \times \frac{\sigma_{\theta n}^2}{\sigma_{\theta n}^2+(\sigma_{\theta o}+(t_n-t_o)\times b)^2}$, où :

[0131]
- θ_n est la valeur candidate sélectionnée,
- $\sigma_{\theta n}$ est la valeur de précision associée à ladite valeur candidate sélectionnée,
- θ_o est la valeur courante du paramètre de recalage de cap θ, et
- $\sigma_{\theta o}$ est la valeur de précision associée à ladite valeur courante.

[0132] Cette sous-étape 160 vient conclure l'étape 124 de déduction du paramètre de recalage de cap θ.

[0133] De retour à la Figure 5, l'étape 124 est suivie d'une étape 126 d'ajustement du cap évalué. Lors de cette étape 126, le système de navigation à l'estime 22 ajuste le cap estimé en appliquant le paramètre de recalage en cap θ : $\hat{\psi}(t) = \psi(t) - \theta$.

[0134] Cette étape 126 vient conclure l'étape 107 de recalage en cap.

[0135] De retour à la Figure 4, les étapes de recalage en position 106 et de recalage en cap 107 sont suivies d'une étape 109 de calcul d'une position du piéton 12 par le système de navigation à l'estime 22. Lors de cette étape 109, le système de navigation à l'estime 22 applique les paramètres de recalage en cap et en position pour déterminer la position du piéton 12 dans le repère prédéterminé. Cette position est déterminée par la formule suivante : $\hat{x}(t) = R(\theta)^T (v(t) - \Delta)$, où :

[0136]
- $\hat{x}(t)$ est une position du piéton 12 dans le repère prédéterminé calculée par le système de navigation à l'estime 22,

- $v(t)$ est la position du piéton 12 dans le repère arbitraire estimée par le système de navigation à l'estime 22,
- θ est le paramètre de recalage de cap,
- $R(\theta)^T$ est la matrice de rotation représentative de la modification de l'orientation par application de l'inverse du paramètre de recalage de cap, et
- Δ est le paramètre de recalage de position.

[0137] Le procédé 100 boucle ensuite sur l'étape 109 de manière à permettre une actualisation continue de la position calculée $\hat{x}(t)$.

[0138] En parallèle, le procédé 100 revient à l'étape 104, de sorte à permettre une mise à jour continue des paramètres de recalage en cap θ et en position Δ à chaque passage du piéton 12 à proximité des balises 54.

[0139] Grâce à l'exemple de réalisation décrit ci-dessus, il est ainsi possible de suivre avec précision, de manière simple et économique, le déplacement de personnes à l'intérieur d'un bâtiment. Cet objectif est en effet atteint grâce à l'infrastructure 18 particulièrement légère qu'il suffit de déployer et aux boîtiers de localisation 16 particulièrement simple dont il suffit d'équiper les personnes à suivre. Les capteurs de mouvement 30 équipant ces boîtiers 16 n'ont pas besoin d'être très précis puisque le système de navigation à l'estime pourra être recalé régulièrement à chaque fois qu'une personne passera à proximité de l'infrastructure 18.

[0140] En particulier, l'utilisation de la technologie UWB pour le système de positionnement relatif 24 est particulièrement avantageuse car elle permet, grâce au faible niveau d'erreur de la localisation UWB, d'obtenir un recalage très précis pour une faible étendue de déplacement. Elle permet donc de réduire très fortement les besoins en infrastructure. Elle est en outre totalement transparente pour le piéton 12, qui n'a pas à accomplir de tâche spéciale pour s'assurer du recalage de son boîtier de localisation 16.

Revendications

[Revendication 1] Procédé de recalage d'attitude (107) pour recaler une attitude fournie par un système de navigation à l'estime (22), le procédé de recalage d'attitude (107) comprenant les étapes suivantes :

- estimation (116), par le système de navigation à l'estime (22), pour chacun d'une pluralité d'instants de détermination compris dans un intervalle de déplacement durant lequel le système de navigation à l'estime (22) se déplace suivant une trajectoire de déplacement, d'une position estimée du système de navigation à l'estime (22) dans un repère fixe arbitraire audit instant de détermination,
- obtention (114), pour chaque instant de détermination, d'une position évaluée du système de navigation à l'estime (22) audit instant de détermination dans un repère fixe prédéterminé, ladite position évaluée ayant été évaluée par un système de positionnement relatif (24), et
- déduction (124) d'au moins un paramètre de recalage d'attitude par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées aux positions estimées corrigées au moyen du ou de chaque paramètre de recalage.

[Revendication 2] Procédé de recalage d'attitude (107) selon la revendication 1, dans lequel le système de navigation à l'estime (22) est porté par un piéton (12), le système de système de navigation à l'estime (22) étant de préférence attaché à un pied ou à une cheville du piéton (12).

[Revendication 3] Procédé de recalage d'attitude (107) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le système de navigation à l'estime (22) comporte un capteur de mouvement (30) pour mesurer un mouvement du système de navigation à l'estime (22) et une unité de traitement (32) pour déduire du mouvement mesuré une attitude et une position du système de navigation à l'estime (22).

[Revendication 4] Procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le système de positionnement relatif (24) est choisi parmi : un système de multi-angulation, un système de multi-latération, un système de mise en correspondance de carte et un système de positionnement visuel, le système de positionnement relatif

(24) comprenant de préférence un dispositif de télémétrie sur bande ultralarge.

[Revendication 5] Procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le repère fixe arbitraire et le repère fixe prédéterminé partagent un axe commun, un paramètre de recalage d'attitude étant constitué par un paramètre, de préférence un angle, de modification d'orientation par rotation autour dudit axe commun.

[Revendication 6] Procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la fonction de coût est représentative d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées et les positions estimées après application aux positions évaluées ou estimées d'une transformation géométrique comprenant une rotation et, de préférence, une translation.

[Revendication 7] Procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape de déduction du paramètre de recalage comprend le calcul (130) d'une valeur candidate pour le paramètre de recalage, l'évaluation (132) d'une valeur de précision de ladite valeur candidate, la comparaison (158) de ladite valeur de précision avec une valeur de précision antérieure associée à une valeur courante du paramètre de recalage, et la détermination (160) d'une valeur future du paramètre de recalage, fonction de la valeur candidate et de la valeur courante, en fonction du résultat de la comparaison (158).

[Revendication 8] Procédé de recalage d'attitude (107) selon la revendication 7, dans lequel la valeur de précision est fonction d'incertitudes sur les positions estimées et les positions évaluées et/ou d'un écart géométrique moyen entre les positions évaluées et les positions estimées après application de la valeur candidate du paramètre de recalage.

[Revendication 9] Procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la déduction (124) du paramètre de recalage comprend les sous-étapes suivantes :

- a) calcul (130) d'une première valeur candidate pour le paramètre de recalage par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées pour N instants de détermination aux positions estimées pour lesdits N instants de détermination corrigées au moyen du paramètre de recalage,
- b) calcul (132) d'une première valeur de précision associée à ladite première valeur candidate,

- c) calcul (134) d'une deuxième valeur candidate pour le paramètre de recalage par minimisation d'une fonction de coût comparant les positions évaluées pour N-1 instants de détermination, correspondant auxdits N instants de détermination moins l'instant de détermination le plus ancien, aux positions estimées pour lesdits N-1 instants de détermination corrigées au moyen du ou de chaque paramètre de recalage,
- d) calcul (136) d'une deuxième valeur de précision associée à ladite deuxième valeur candidate,
- e) comparaison (140) des première et deuxième valeurs de précision, et
- f) sélection (142) de la première valeur candidate lorsque la première valeur de précision reflète la meilleure précision.

[Revendication 10] Procédé de recalage d'attitude (107) selon la revendication 9 dans lequel, lorsque la valeur de précision reflétant la meilleure précision est constituée par la deuxième valeur de précision, la déduction (124) du paramètre de recalage comprend les sous-étapes supplémentaires suivantes :

- suppression (144) de la position évaluée et de la position estimée pour l'instant de détermination le plus ancien, et
- répétition des sous-étapes a) à e) avec un nombre N réduit de 1.

[Revendication 11] Procédé (100) de localisation d'un objet (12) dans un espace prédéfini (14), l'objet (12) portant un système de navigation à l'estime (22), le procédé (100) comprenant les étapes suivantes :

- démarrage (102) du système de navigation à l'estime (22),
- recalage en attitude (107) du système de navigation à l'estime (22) à l'aide d'un système de positionnement relatif (24) comprenant une infrastructure (18) installée au niveau d'un point d'accès (19) à l'espace prédéfini (14), de manière à obtenir un paramètre de recalage d'attitude, ledit recalage en attitude (107) mettant en œuvre un procédé de recalage en attitude selon l'une quelconque des revendications précédentes,

- recalage en position (106) du système de navigation à l'estime (22) à l'aide d'un système de positionnement relatif (24) comprenant une infrastructure (18) installée au niveau dudit point d'accès (19) à l'espace prédéfini (14), de manière à obtenir un paramètre de recalage de position, et
- calcul (109), par le système de navigation à l'estime (22), au moyen du paramètre de recalage en attitude et du paramètre de recalage en position, d'une position calculée du système de navigation à l'estime (22) dans le repère prédéterminé.

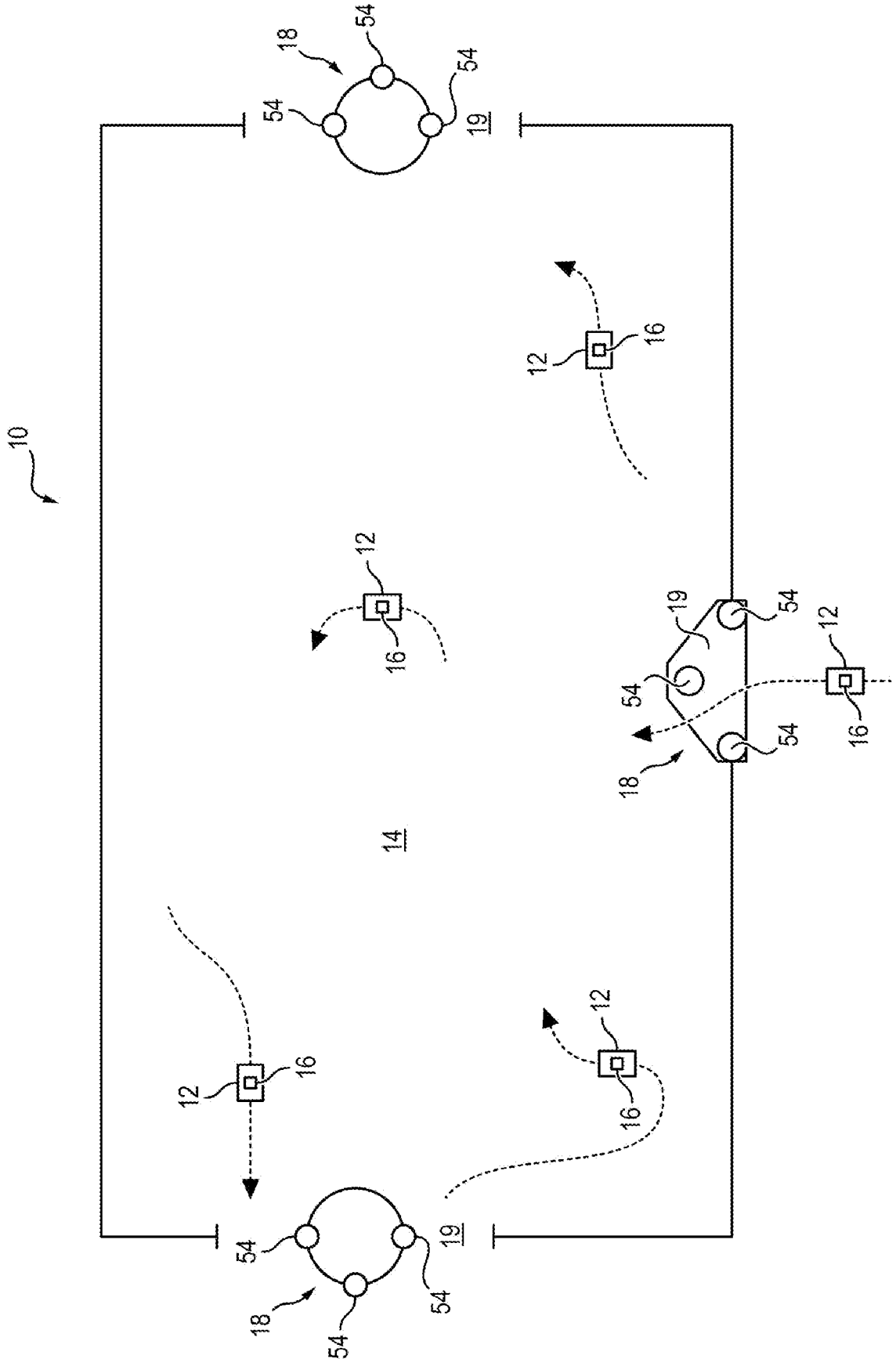
[Revendication 12] Procédé de localisation (100) selon la revendication 11, dans lequel l'infrastructure (18) est embarquée à bord d'un véhicule lui-même équipé d'un système de localisation et d'orientation permettant de calculer la position de l'infrastructure (18) dans le repère prédéterminé.

[Revendication 13] Système de navigation à l'estime (22) comportant un capteur de mouvement (30) pour mesurer un mouvement du système de navigation à l'estime (22) et une unité de traitement (32) pour déduire du mouvement mesuré une attitude et une position du système de navigation à l'estime (22) dans un repère fixe, l'unité de traitement étant configurée pour mettre en œuvre un procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 pour recaler ladite attitude.

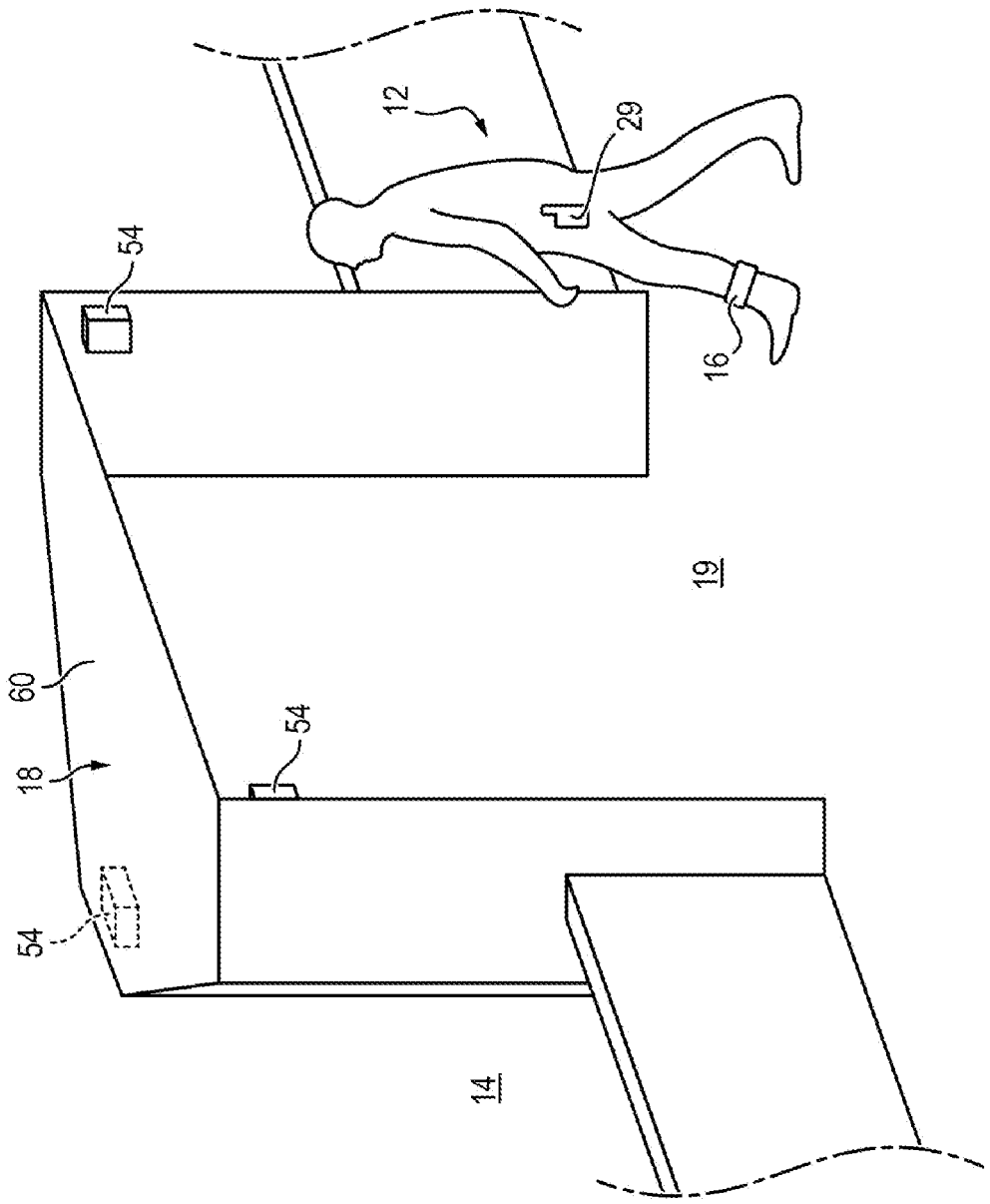
[Revendication 14] Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 lorsque ledit programme est exécuté par un processeur.

[Revendication 15] Moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel est enregistré un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de recalage d'attitude (107) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

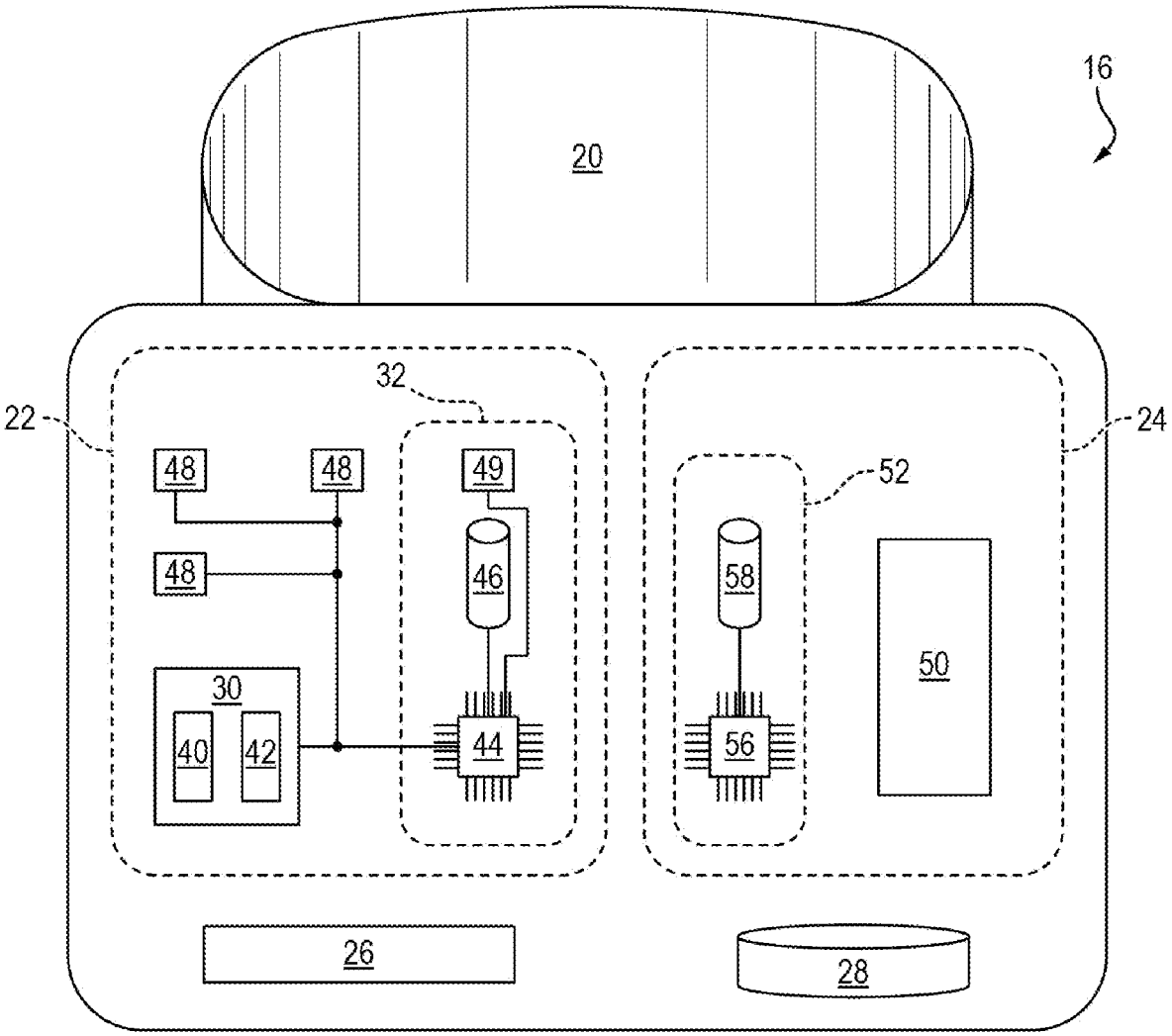
[Fig. 1]



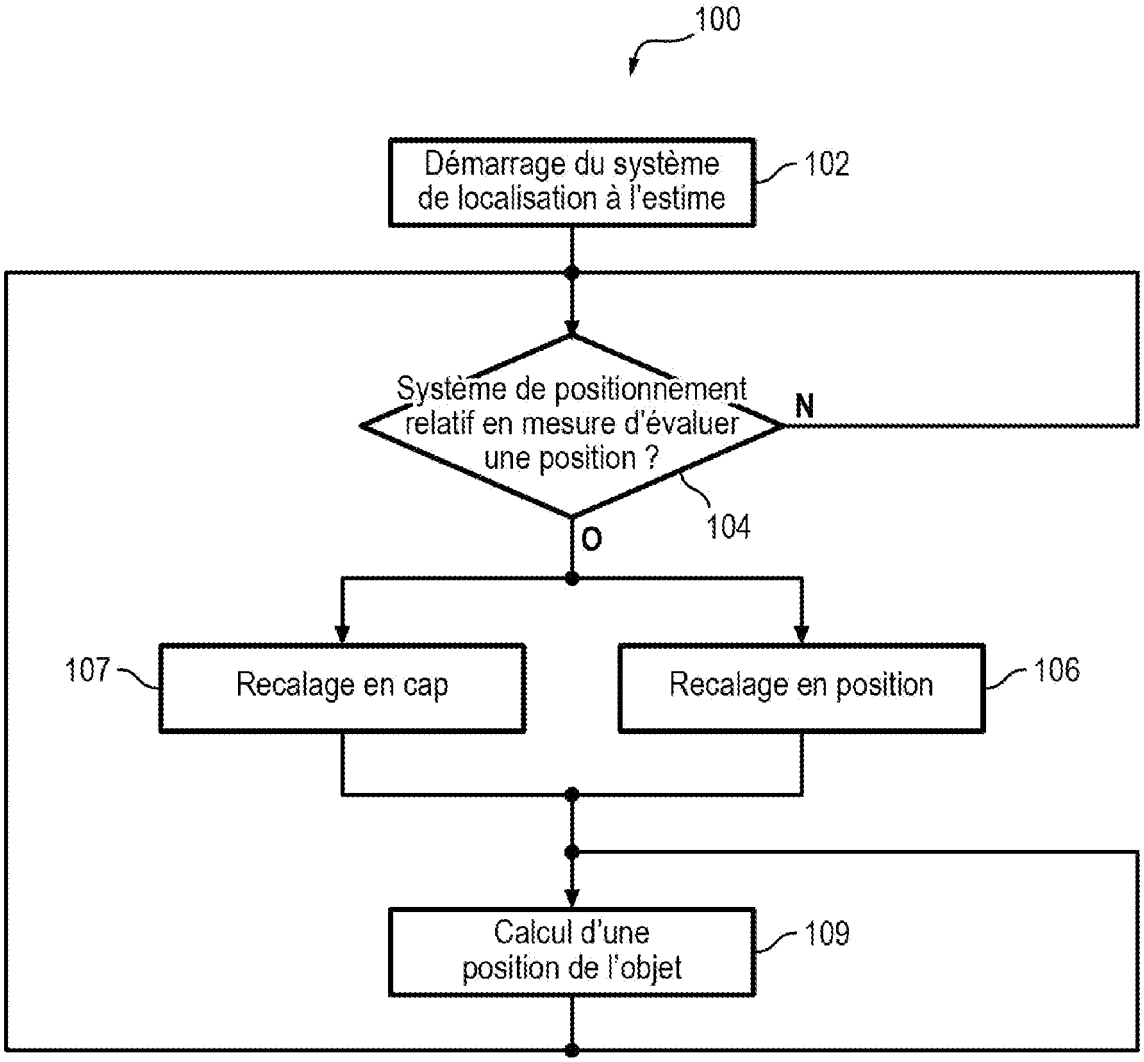
[Fig. 2]



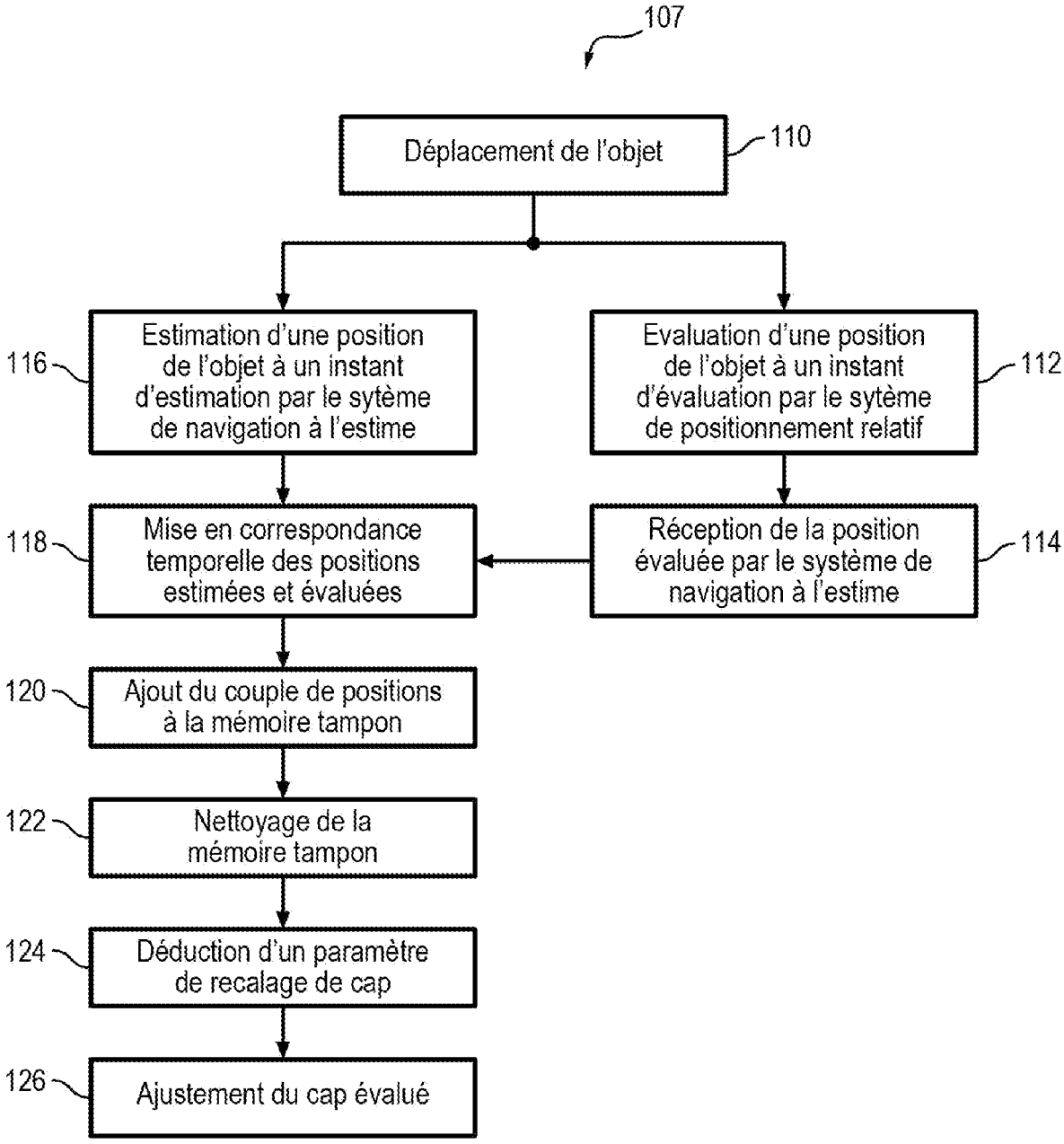
[Fig. 3]



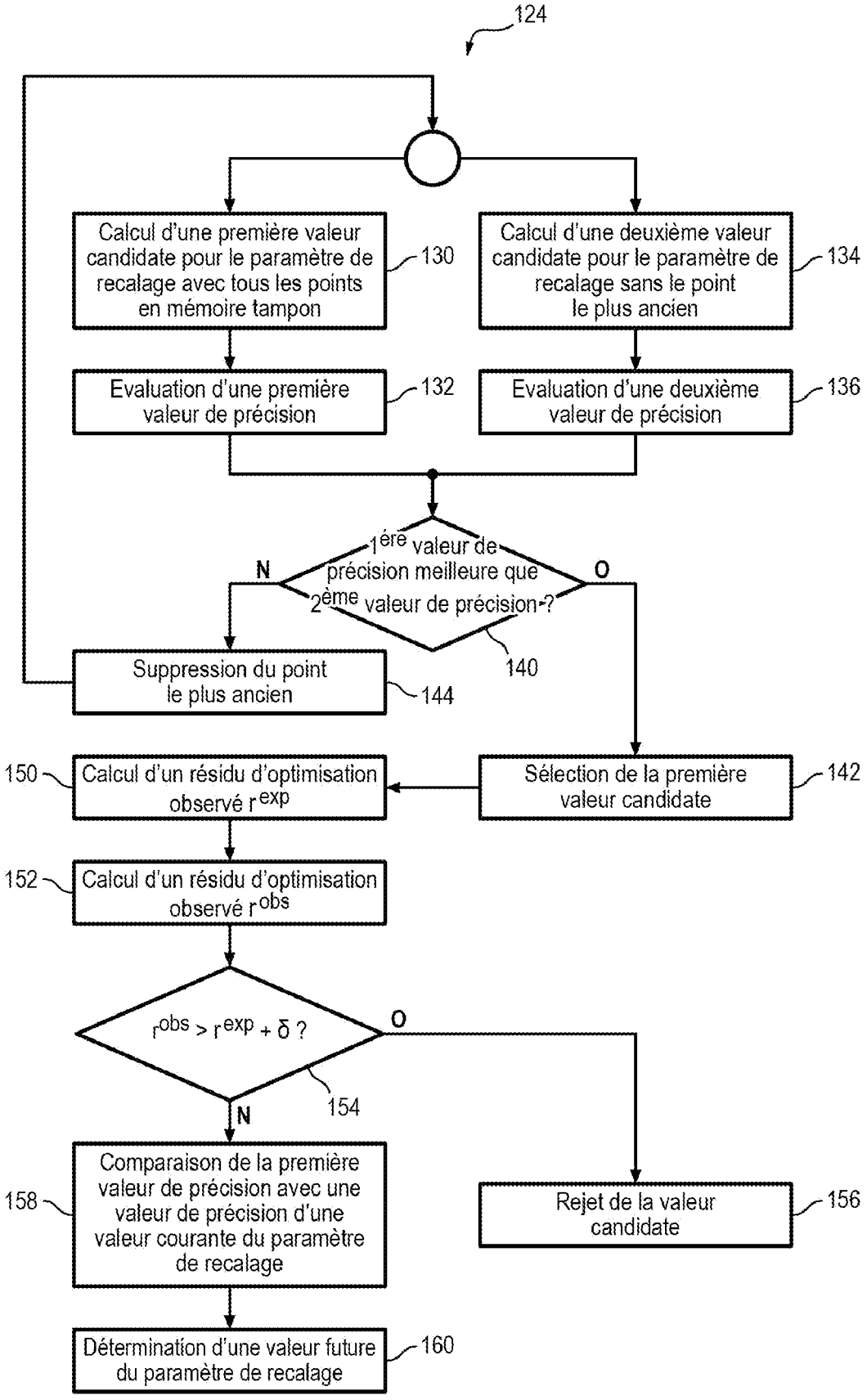
[Fig. 4]


100
Démarrage du système de localisation à l'estime
102
Système de positionnement relatif en mesure d'évaluer une position ?
N
104
O
107
Recalage en cap
Recalage en position
106
Calcul d'une position de l'objet
109

[Fig. 5]


107
Déplacement de l'objet
110
Estimation d'une position de l'objet à un instant d'estimation par le sytème de navigation à l'estime
116
Evaluation d'une position de l'objet à un instant d'évaluation par le sytème de positionnement relatif
112
Mise en correspondance temporelle des positions estimées et évaluées
118
Réception de la position évaluée par le système de navigation à l'estime
114
Ajout du couple de positions à la mémoire tampon
120
Nettoyage de la mémoire tampon
122
Déduction d'un paramètre de recalage de cap
124
Ajustement du cap évalué
126

[Fig. 6]


124
Calcul d'une première valeur candidate pour le paramètre de recalage avec tous les points en mémoire tampon
130
Calcul d'une deuxième valeur candidate pour le paramètre de recalage sans le point le plus ancien
134
Evaluation d'une première valeur de précision
132
Evaluation d'une deuxième valeur de précision
136
1ère valeur de précision meilleure que 2ème valeur de précision ?
N
O
140
Suppression du point le plus ancien
144
150
Calcul d'un résidu d'optimisation observé r exp
Sélection de la première valeur candidate
142
152
Calcul d'un résidu d'optimisation observé r obs
r obs > r exp + δ ?
O
N
154
158
Comparaison de la première valeur de précision avec une valeur de précision d'une valeur courante du paramètre de recalage
Rejet de la valeur candidate
156
Détermination d'une valeur future du paramètre de recalage
160

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 (nouveauté) 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

[x] Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

[x] 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.

[x] 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

US 10 088 318 B2 (QUALCOMM INC [US])
2 octobre 2018 (2018-10-02)

US 2012/173190 A1 (CZOMPO JOSEPH [US] ET AL) 5 juillet 2012 (2012-07-05)

US 10 197 400 B2 (SHARP LABORATORIES AMERICA INC [US])
5 février 2019 (2019-02-05)

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

NEANT