



(51) Classification internationale des brevets :
G06F 3/033 (2006.01) **G01C 21/16** (2006.01)

Julien De Ratz (FR). **VASSILEV, Andrea** [FR/FR]; 30, rue Ampère, F-38000 Grenoble (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2009/058024

(74) Mandataire : **NGUYEN-VAN-YEN, Christian**;
Immeuble "Visium", 22, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(22) Date de dépôt international :
26 juin 2009 (26.06.2009)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0803632 27 juin 2008 (27.06.2008) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
MOVEA S.A [FR/FR]; Minatec BHT, 7, Parvis Louis Née, F-38040 Grenoble Cedex 9 (FR).
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
BASSOMPIERE, Cindy [FR/FR]; 12, rue des Fleurs, F-38000 Grenoble (FR). **CARITU, Yanis** [FR/FR]; La Cote, F-38134 Saint Joseph La Riviere (FR).
FLAMENT, Bruno [FR/FR]; Le Tracou, F-38134 Saint

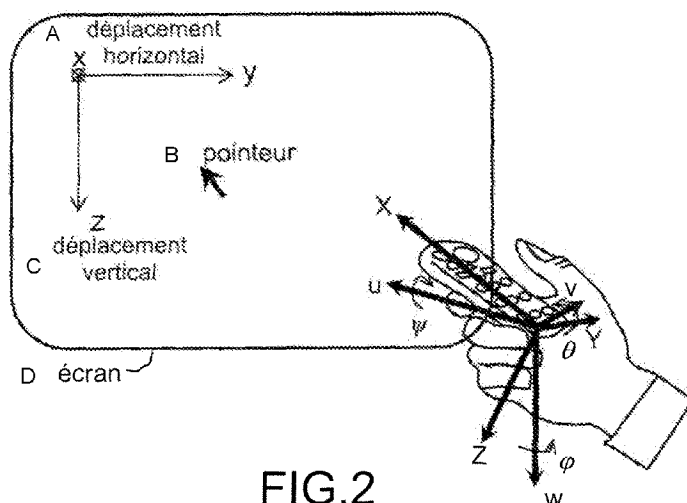
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,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

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

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : POINTER WITH MOTION SENSING RESOLVED BY DATA MERGING

(54) Titre : POINTEUR A CAPTURE DE MOUVEMENT RESOLUE PAR FUSION DE DONNEES



A... horizontal displacement
B... pointer
C... vertical displacement
D... screen

trois axes. L'invention

(57) Abstract : The invention applies to a pointing device of a mobile element, for example a cursor, on a plane surface. The pointing device comprises a first sensor for measuring the angular rates of the device and a second sensor for the linear accelerations along three dimensions of said device. Preferably, the first sensor is a gyrometer with two or three axes and the second sensor is a three-axis accelerometer. The invention makes it possible to render the motions of the mobile element in the surface of the orientation in which the pointing device is held by its user. This result is achieved by global resolution of the angles of torsion by virtue of the combining of the measurements of the first and second sensors either within an extended Kalman filter or by applying an optimization criterion.

(57) Abrégé : L'invention s'applique à un dispositif de pointage d'un élément mobile, par exemple un curseur, sur une surface plane. Le dispositif de pointage comprend un premier capteur de mesure des vitesses angulaires du dispositif et un deuxième capteur des accélérations linéaires selon trois dimensions dudit dispositif. Préférentiellement, le premier capteur est un gyromètre à deux ou trois axes et le deuxième capteur est un accéléromètre

[Suite sur la page suivante]



Publiée :

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

permet de rendre les mouvements de l'élément mobile dans la surface de l'orientation dans laquelle le dispositif de pointage est tenu par son utilisateur. Ce résultat est atteint par résolution globale des angles de torsion grâce à la combinaison des mesures des premier et deuxième capteurs soit au sein d'un filtre de Kalman étendu soit par application d'un critère d'optimisation.

POINTEUR A CAPTURE DE MOUVEMENT RESOLUE PAR FUSION DE DONNEES

L'invention concerne l'utilisation d'un objet instrumenté par des capteurs de mouvement utilisé pour convertir des mouvements d'un utilisateur porteur de l'objet en mouvements d'un point dans un plan. Ces objets peuvent être ainsi désignés génériquement par le terme « pointeurs ». L'utilisateur tient
5 normalement le pointeur dans sa main, bien que l'on puisse facilement envisager d'autres modalités de portage selon les applications telles que la fixation sur la tête ou un des membres du porteur. Ils peuvent avoir des fonctions diverses, notamment : télécommande d'un appareil audiovisuel (télévision, lecteur/enregistreur de disques, chaîne hi-fi) , où le point est un
10 programme ou une fonction à choisir dans un menu ; télécommande d'un appareil ménager où le pointeur désigne l'appareil et lui fait exécuter une fonction ; télécommande d'ordinateur où le pointeur est programmé selon les applications exécutées par l'ordinateur ; interface de jeux électroniques où, selon le jeu, le pointeur peut être un objet manipulé par l'utilisateur (club de
15 golf, raquette de tennis, boule de bowling, arme de point, de hanche ou d'épaule, etc...) ; assistance pour l'interface homme-machine ou la télécommande à destination des personnes à mobilité réduite (fixation d'un pointeur par exemple sur la tête, les lunettes, une oreillette, ou tout autre partie liée aux mouvements de la tête, pour aider les personnes en
20 déficience motrice ou inaptes à utiliser une souris classique à la main, à diriger un pointeur à l'écran. En général, le pointeur est doté de boutons permettant de sélectionner une commande dont la programmation permet d'exécuter une fonction (ou un service) ou d'associer un état du pointeur différent pendant le geste de pointage (trajectoire avec bouton appuyé vs
25 trajectoire avec bouton relâché, ce qui permet par exemple de prendre comme information non pas la situation d'un point sur l'écran mais une trajectoire de curseur qu'on peut elle-même associer à une action, etc...). Les mouvements du pointeur dans l'espace comportent des rotations et des translations. Ils peuvent être mesurés par des capteurs de différents types :
30 des capteurs d'image permettent de mesurer à la fois les rotations et les translations par comparaison d'images successives et transformations

géométriques; un magnétomètre, un accéléromètre ou un gyromètre uni-axe peuvent mesurer une rotation autour dudit axe ; une combinaison de magnétomètres, accéléromètre et/ou de gyromètres peut mesurer des translations et des rotations autour de plusieurs axes ; une combinaison de capteurs des types précédents permet d'améliorer la précision des mesures, la redondance permettant de déterminer des intervalles de confiance; la combinaison peut comprendre une ou plusieurs caméras et plusieurs capteurs magnétométriques, accélérométriques et/ou gyrométriques. Un autre capteur de rotation, insensible aux accélérations, peut être un capteur de luminosité. Si c'est une cellule photoélectrique, il est connu que la quantité de lumière reçue par la dite cellule est proportionnelle à sa surface de réception de la lumière et au cosinus de l'angle d'inclinaison des rayons avec sa normale. La source lumineuse peut être le soleil, ou une autre source quasi-ponctuelle, type ampoule, située suffisamment loin pour que ses rayons d'émission soient considérés parallèles entre eux sur tout le volume de l'expérience gestuelle. Pour éviter les problèmes de luminosité ambiante changeante, on peut avantageusement utiliser un capteur type « œil de mouche » multi-facette, la direction angulaire de réception étant la facette qui mesure le flux lumineux le plus élevé.

Le problème général que ces applications des pointeurs à capture de mouvement doivent résoudre est de tenir compte de la manière dont l'utilisateur tient le pointeur, en particulier de son orientation dans l'espace. En effet, si le pointeur est tenu par exemple à 45° au lieu d'être tenu à l'horizontale, un mouvement horizontal ou vertical du pointeur se traduira sur l'écran sur lequel il pointe par un mouvement diagonal. Ce phénomène est connu sous le nom de « tilt » ou torsion. Il y a donc lieu de le corriger pour que le pointeur soit utilisable.

Une première méthode pour résoudre ce problème est de prévoir des moyens mécaniques pour que les capteurs restent en position sensiblement fixe dans le référentiel de l'écran lorsque l'utilisateur imprime un mouvement de torsion au pointeur. Il est ainsi possible de prévoir que le ou les capteurs sont mobiles au sein du pointeur à la manière d'un pendule dont la base a une inertie suffisante pour rester sensiblement fixe en dépit des mouvements de torsion imprimés au pointeur. Un tel dispositif est divulgué par le brevet US 5,453,758. Il est également possible d'encapsuler lesdits capteurs dans

un dispositif de stabilisation constitué par un couple de sphères liées au pointeur par des axes de rotation, comme c'est le cas dans un compas embarqué sur un bateau ou un aéronef. Un tel dispositif est divulgué par le brevet US 5,440,326. Un premier inconvénient de ces dispositifs mécaniques de compensation de la torsion du pointeur est qu'ils sont limités à des plages d'angles de torsion et de vitesse de déplacement réduites. Un deuxième inconvénient est que ces dispositifs sont volumineux. . Un troisième inconvénient réside dans l'inertie mécanique de ces dispositifs et le retard à l'alignement horizontal induit, ce qui les proscriit des applications temps réel de pointage.

Une deuxième méthode pour compenser cette torsion du pointeur consiste à calculer les angles de torsion en utilisant les mesures de certains des capteurs embarqués dans le pointeur, notamment des accéléromètres, et d'effectuer ensuite une transformation des mesures des autres capteurs du référentiel du pointeur dans celui de l'écran en appliquant auxdites mesures une ou plusieurs matrices de rotation dont les coefficients sont fonction du ou des angles de torsion. De telles méthodes sont divulguées notamment par le brevet US 5,902,968 où le capteur principal est un gyromètre et le capteur de calcul des angles de torsion est un accéléromètre, la demande US 2004/0075650 où le capteur principal est une caméra couplée à des accéléromètres, la combinaison permettant la correction de tilt, la demande US 2002/0140745 où le capteur principal est un récepteur GPS et le capteur de correction de tilt un ensemble d'accéléromètres et le brevet US 7,158,118 où le capteur principal est constitué par un ou plusieurs gyromètres et le capteur de correction de tilt est constitué par un ou plusieurs accéléromètres. Cette méthode présente l'inconvénient de fournir des résultats bruités dans la mesure où les angles de torsion sont calculés avec les mesures d'une partie des capteurs seulement.

La présente invention résout les problèmes non résolus par l'art antérieur en procurant un dispositif compact et apte à compenser l'orientation donnée au pointeur dans une plage de fonctionnement large. Pour ce faire, l'invention peut mettre en œuvre plusieurs méthodes différentes de résolution par fusion de données. Un premier groupe de méthodes fait appel aux observateurs ; un deuxième groupe à des critères d'optimisation.

A cet effet, la présente invention divulgue un dispositif de pointage par un utilisateur sur un élément mobile dans une surface plane, ledit dispositif comprenant au moins un premier capteur de mesure des vitesses angulaires (ω_y , ω_z) dudit dispositif autour d'au moins deux de ses axes orthogonaux (Y, Z), au moins un deuxième capteur de mesure des déplacements linéaires dudit dispositif selon lesdits deux axes (Y, Z) et un troisième axe orthogonal (X), un module de calcul des déplacements (y, z) à imprimer à l'élément mobile dans la surface plane en fonction des déplacements (X, Y, Z) du pointeur dans l'espace, ledit module de calcul comprenant un sous-module de compensation de la torsion imprimée au dispositif de pointage, ledit dispositif de pointage étant caractérisé en ce que le sous-module de compensation met en œuvre un algorithme de fusion de données appliqué aux sorties des premier et deuxième capteurs.

Avantageusement, le premier capteur est un gyromètre à deux axes.

Avantageusement, le premier capteur est un gyromètre à trois axes.

Avantageusement, le deuxième capteur est un accéléromètre à trois axes produisant des sorties a_x , a_y , a_z .

Avantageusement, l'algorithme de fusion de données est un filtrage de Kalman étendu.

Avantageusement, le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) comprend au moins un angle de torsion (θ , ψ) du dispositif de pointage ; son modèle d'état comprend au moins l'expression de la vitesse angulaire (ω) dudit dispositif de pointage en fonction d'au moins un des angles de torsion (θ , ψ) ; son vecteur de mesures comprend au moins les sorties du deuxième capteur (a_x , a_y , a_z).

Avantageusement, le vecteur d'état du filtre de Kalman est initialisé à un état $[\theta_0 \ \psi_0]$ choisi a priori et en ce que l'estimation a priori du vecteur d'état ($\hat{x}_k^-$) à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculé par la formule suivante :

$$\hat{x}_k^- = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\psi}_k^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_{k-1} \\ \hat{\psi}_{k-1} \end{pmatrix} + T_e \cdot \begin{pmatrix} \alpha \sqrt{\omega_y^2 + \omega_z^2} \\ \omega_x \end{pmatrix} \quad \text{où } T_e \text{ est la période d'échantillonnage}$$

du filtre.

Avantageusement, l'estimation a priori des mesures ($\hat{y}_k^-$) à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculé par la formule suivante :

$$\hat{y}_k^- = \begin{bmatrix} -\sin \hat{\theta}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \sin \hat{\psi}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \cos \hat{\psi}_k^- \end{bmatrix}$$

Avantageusement, le gain G du filtre de Kalman est calculé par les formules suivantes :

$$A_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1}|_{k-1}}$$

$$5 \quad C_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1}|_{k-1}}$$

$$M = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ P_f \cdot C^T & P_f \cdot A^T \\ 0 & Q_f \end{bmatrix}$$

$$HM = qr(M) = \begin{bmatrix} L & K \\ 0 & P_f \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = K^T \cdot L^{-T}$$

- 10 Avantageusement, la correction de l'état estimé a priori à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculée par la formule suivante :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot \begin{pmatrix} a_{X,k} \\ a_{Y,k} \\ a_{Z,k} \end{pmatrix} - \hat{y}_k^-$$

Avantageusement, les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par les formules suivantes :

$$15 \quad \begin{cases} \omega_v = \cos \hat{\psi} \cdot \omega_Y - \sin \hat{\psi} \cdot \omega_Z \\ \omega_w = -\sin \hat{\theta} \cdot \omega_X + \cos \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\psi} \cdot \omega_Y + \cos \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\psi} \cdot \omega_Z \end{cases}$$

Avantageusement, le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : la matrice P_0 de confiance accordée à la valeur initiale de l'état (x_0) comprend des valeurs choisies de l'ordre de 10^{-2} ; la matrice Q de confiance accordée à son modèle d'état comprend des valeurs choisies dont les plus élevées sont légèrement supérieures à l'écart-type du bruit des mesures du premier capteur ; la matrice R de confiance accordée au modèle de mesures du filtre de Kalman comprend des valeurs choisies dont les plus élevées sont légèrement supérieures à l'écart-type du bruit des mesures du deuxième capteur.

Avantageusement, le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) est un quaternion de la forme $[\cos\alpha/2, \sin\alpha/2 u_1, \sin\alpha/2 u_2, \sin\alpha/2 u_3]$; son modèle d'état est de la forme :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} ;$$

- 5 son vecteur de mesures comprend au moins les sorties du deuxième capteur (a_x, a_y, a_z).

Avantageusement, les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par la formule suivante :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \omega_u \\ \omega_v \\ \omega_w \end{pmatrix} = q \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \otimes \bar{q}$$

- 10 Avantageusement, le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) est de la forme $[a, b, c, d] = [\sin\theta, \cos\theta, \sin\psi, \cos\psi]$; son modèle d'état est de la forme :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{c} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} ;$$

son modèle de mesures est de la forme :

$$15 \quad y = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ b.c \\ b.d \end{bmatrix}$$

Avantageusement, les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \omega_v = d.\omega_y - c.\omega_z \\ \omega_w = -a.\omega_x + b.c.\omega_y + b.d.\omega_z \end{cases}$$

- 20 Avantageusement, le vecteur d'état du filtre (x) de Kalman est de la forme $[\theta, \psi, \omega_u, \omega_v, \omega_w]$ et en ce que son vecteur de mesures est de la forme $[a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]$.

Avantageusement, le modèle d'état du filtre de Kalman est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \alpha \sqrt{\omega_v^2 + \omega_w^2} \\ \dot{\psi} = \omega_u \\ \dot{\omega}_u = -\frac{1}{\tau} \omega_u \\ \dot{\omega}_v = -\frac{1}{\tau} \omega_v \\ \dot{\omega}_w = -\frac{1}{\tau} \omega_w \end{cases}$$

Où τ est la constante de temps du modèle d'évolution de la vitesse angulaire et en ce que le modèle de mesures est de l'une des formes suivantes :

$$\begin{cases} a_X = -\sin \theta \cdot \cos \psi \\ a_Y = -\sin \psi \\ a_Z = \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \omega_Y = \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \omega_Z = \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{cases}$$

5 ou

$$\begin{cases} a_X = -\sin \theta \cdot \cos \psi \\ a_Y = -\sin \psi \\ a_Z = \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \omega_X = \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \omega_Y = \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \omega_Z = \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{cases}$$

Avantageusement, la méthode de résolution optimale est une optimisation ayant pour critère la fonction :

$$f = \sum_{i=1}^n \left(\text{mesures}_{\text{capteurs}} - \text{mesures}_{\text{estimées}} \right)^T \cdot \left(\text{mesures}_{\text{capteurs}} - \text{mesures}_{\text{estimées}} \right)$$

10 Avec un couple de vecteurs ($\text{mesures}_{\text{capteurs}}$, $\text{mesures}_{\text{estimées}}$) choisi dans le groupe

$$\begin{aligned} (\text{mesures}_{\text{capteurs}} = \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \\ 0 \text{ ou } \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix}, \text{mesures}_{\text{estimées}} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{bmatrix}), \\ (\text{mesures}_{\text{capteurs}} = \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix}, \text{mesures}_{\text{estimées}} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \end{bmatrix}) \end{aligned}$$

Un autre avantage de l'invention est qu'elle permet de compenser les angles de roulis et de tangage, et non pas seulement le premier comme c'est le cas dans la plupart des documents de l'art antérieur. En outre, la présente invention est compatible de plusieurs types de capteurs dont la configuration
5 peut être choisie notamment en fonction du coût objectif de l'application et des performances spécifiées. Un avantage supplémentaire est que les paramètres de l'algorithme de la compensation du tilt peuvent être également ajustés en fonction dudit coût objectif et desdites performances spécifiées.

10 L'invention sera mieux comprise, ses différentes caractéristiques et avantages ressortiront de la description qui suit de plusieurs exemples de réalisation et de ses figures annexées dont :

- La figure 1 représente de manière simplifiée l'architecture matérielle d'un pointeur selon un mode de réalisation de l'invention ;
- 15 - La figure 2 illustre la définition des différents repères dans lesquels sont calculés les mouvements d'un pointeur et d'un curseur sur un écran dans un mode de réalisation de l'invention ;
- La figure 3 illustre les relations de passage entre les différents repères de la figure 2 ;
- 20 - La figure 4 explicite les coordonnées et les angles de roulis et de tangage utilisés dans la description de la présente invention ;
- La figure 5 représente un dispositif de pointage dans un mode de réalisation comprenant un gyromètre trois axes ;
- La figure 6 est un organigramme des traitements dans plusieurs
25 modes de réalisation de l'invention.

La figure 1 représente de manière simplifiée l'architecture matérielle d'un pointeur selon un mode de réalisation de l'invention. Le dispositif de pointage
10 ou pointeur a avantageusement la forme et l'aspect d'une télécommande de télévision, c'est-à-dire qu'il est de forme allongée, apte à être tenu dans la main de l'utilisateur. Alternativement, il peut d'ailleurs être fixé sur un des membres de l'utilisateur, notamment dans les applications de jeux. Le pointeur est associé à un élément mobile susceptible de se déplacer dans une surface plane, par exemple un écran ou une surface d'écriture. Les
35 mouvements de cet élément mobile sont contrôlés par les mouvements du

pointeur. Le pointeur est avantageusement pourvu de boutons sur plusieurs de ses faces pour commander les fonctions auxquelles la télécommande permet d'accéder. Le pointeur comprend une alimentation 60 et un canal de transmission 70 à l'objet à commander. La transmission par voie radiofréquence peut s'opérer avec une forme d'onde et un protocole Bluetooth ou avec une forme d'onde et un protocole Wi-Fi (Norme 802.11g). La transmission peut s'effectuer par voie infra-rouge ou par voie radiofréquence. Les signaux transmis sont les commandes correspondant d'une part à l'enfoncement d'un des boutons présents sur le corps du pointeur, qui déclenche l'exécution d'une fonction et d'autre part à la capture du mouvement du pointeur pour commander les mouvements d'un curseur sur l'écran de contrôle de l'objet à commander. Ces signaux de commande sont générés par le module de calcul 40 qui comprend un sous-module de compensation 50 de la torsion imprimée au pointeur par l'utilisateur. Ce module de calcul comprend un microprocesseur, par exemple un DSP Texas Instruments TMS320VC5509 pour les applications les plus exigeantes en temps de calcul, ou un microcontrôleur 32 bits à cœur ARM, par exemple un de ceux de la famille STR9, notamment le STR9F12FAW32 de STM. Le module de calcul comprend également de préférence une mémoire flash nécessaire au stockage du code à exécuter et des données permanentes qui lui sont nécessaires et une mémoire dynamique de travail. Le module de calcul reçoit en entrée les sorties de deux types de capteurs. D'une part, des capteurs de vitesses angulaires 20 ont pour fonction de mesurer les rotations du pointeur selon deux ou trois axes. Ces capteurs seront préférentiellement des gyromètres. Il peut s'agir d'un gyromètre deux axes ou d'un gyromètre trois axes. Les mérites respectifs de ces deux modes de réalisation sont discutés plus loin dans la description en liaison avec les commentaires relatifs à la figure 5. On peut par exemple utiliser les gyromètres fournis par Analog Devices de référence ADXRS300. Mais tout capteur capable de mesurer des vitesses angulaires est utilisable. On peut en particulier envisager une caméra dont le traitement d'image compare des images successives pour en déduire les déplacements qui sont des combinaisons de translations et de rotations. Il faut cependant alors disposer d'une capacité de calcul sensiblement supérieure à celle dont a besoin un gyromètre. On peut également utiliser des magnétomètres dont la mesure du déplacement

par rapport au champ magnétique terrestre permet de mesurer les rotations par rapport au référentiel de ce champ, on peut par exemple utiliser les magnétomètres de référence HMC1001 ou HMC1052 de la société Honeywell ou KMZ41 de la société NXP. Quels que soient les capteurs
5 utilisés, leurs mesures sont lues dans le référentiel du pointeur. Si ce référentiel n'est pas identique à une translation de position près au référentiel de l'utilisateur et au référentiel du pointeur, les mesures sont affectées d'un biais qui va entraîner des déplacements incohérents de l'élément mobile. C'est pourquoi il est prévu au sein du module de calcul 40 un sous-module
10 de compensation 50 dont la fonction est de calculer les déplacements de l'élément mobile dans la surface plane en fonction des déplacements du membre de l'utilisateur qui tient le pointeur, ladite fonction étant corrigée de l'impact de la torsion imprimée au pointeur par l'utilisateur. Le sous-module de compensation récupère en entrée les sorties d'un deuxième capteur 30
15 qui mesure les accélérations linéaires du pointeur a_x , a_y , a_z . Préférentiellement, le capteur 30 est un accéléromètre trois axes. Avantageusement, les capteurs 20 et 30 sont réalisés tous deux en technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), éventuellement au sein d'un même circuit (par exemple accéléromètre de référence ADXL103
20 d'Analog Devices, LIS302DL de Thomson, gyromètre de référence MLX90609 de Melixis, ADXRS300 d'Analog Devices). Le cas échéant, le module MEMS sera situé près du centre de gravité du dispositif de pointage, sauf si un mode particulier de réalisation, tel que celui illustré par la figure 5, justifie un positionnement différent. On notera cependant qu'une caméra
25 assortie d'un dispositif de traitement d'images peut également remplacer les deux capteurs 20 et 30, les vitesses angulaires et accélérations linéaires de déplacement du pointeur pouvant être déduites d'une corrélation d'images successives.

30 La figure 2 illustre les transformations de repères permettant de s'affranchir de ladite torsion.

Nous définissons par le terme repère écran le repère orthonormé lié à l'écran (xyz), l'axe z étant dirigé vers le bas. Le déplacement de l'élément mobile est défini dans ce repère suivant les axes y et z. Un second repère correspond
35 au repère du dispositif (XYZ), X étant dans la direction principale de

- pointage, Y vers la droite et Z vers le bas du dispositif. Le dernier repère (uvw), nommé repère du porteur, est associé à la partie du corps qui crée le mouvement de pointage. Ce repère est défini en ramenant le repère (XYZ) dans le plan horizontal. Le passage du repère du porteur au repère du
- 5 dispositif s'effectue donc par deux rotations successives (tangage θ ou « pitch » en anglais, roulis ψ ou « roll » en anglais). Par ailleurs, le porteur n'étant pas nécessairement placé face à l'écran, le passage de ce repère au repère écran (xyz) s'effectue par une rotation (lacet φ ou « yaw » en anglais).
- 10 La figure 3 illustre les relations de passage entre les différents repères de la figure 2. Nous cherchons ici à traduire un mouvement horizontal du porteur (avec rotation) par un déplacement horizontal de l'élément mobile et un mouvement vertical du porteur (avec rotation) par un déplacement vertical de l'élément mobile. De manière intuitive, nous voyons que même si l'utilisateur
- 15 ne se trouve pas face à l'écran (angle de lacet non nul), le résultat ne sera pas modifié puisque les mouvements se feront toujours de manière horizontale et verticale. Par conséquent, les rotations doivent être mesurées dans le repère du porteur et non dans le repère écran. L'angle de lacet, traduisant la rotation du repère écran au repère du porteur, n'intervient donc
- 20 pas dans notre problème.
- Un déplacement horizontal de l'élément mobile est donc défini par une rotation autour de l'axe w , mesurée par ω_w , et un déplacement vertical par une rotation autour de l'axe v , mesurée par ω_v .
- Nous définissons la position standard du dispositif comme étant la position
- 25 dans laquelle les repères (uvw) et (XYZ) sont alignés, i.e. les angles de tangage et roulis sont nuls. Le dispositif se situe alors dans un plan horizontal, tourné par rapport au repère écran d'un angle de lacet.
- Lorsque le dispositif se trouve dans cette position, les vitesses angulaires mesurées par les deux axes gyromètres (ω_y et ω_z) sont égales à ω_v et ω_w ,
- 30 respectivement. Ces deux valeurs donnent une information directe sur les déplacements horizontaux (rotation autour de l'axe w représentée par ω_w) et verticaux (rotation autour de l'axe v représentée par ω_v) et donc le déplacement de l'élément mobile sur l'écran (d_y et d_z), ceci quelque soit l'angle de lacet.

En revanche, lorsque le dispositif ne se trouve plus dans une position standard (angles de roulis et/ou tangage non nuls donc repères (uvw) et (XYZ) non alignés) et que le porteur réalise des déplacements verticaux et horizontaux (rotations autour des axes v et w), les mesures ω_Y et ω_Z sont différentes de ω_v et ω_w . Il n'est donc pas possible de les associer directement au déplacement de l'élément mobile à l'écran. Il est alors nécessaire de connaître l'orientation du repère du dispositif par rapport au repère du porteur (plan horizontal), donc les angles de tangage et roulis, afin de rapporter les mesures gyrométriques, ω_Y et ω_Z , dans le repère du porteur (uvw) et en déduire les déplacements d_Y et d_Z .

Le dispositif de l'invention permet de déterminer les vitesses angulaires ω_v et ω_w , en prenant en compte d'éventuels angles de tangage et de roulis.

La figure 4 explicite les coordonnées et les angles de roulis et de tangage utilisés dans la description de la présente invention. La matrice de rotation R exprimant la rotation pour passer du repère (uvw) au repère (XYZ) est :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \cdot \sin \psi & \cos \psi & \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \sin \theta \cdot \cos \psi & -\sin \psi & \cos \theta \cdot \cos \psi \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 1}$$

Les capteurs accélérométriques et gyrométriques renvoient respectivement les mesures notées (a_X, a_Y, a_Z) et (ω_Y, ω_Z) dans le repère (XYZ) du dispositif de pointage. Le problème à résoudre est donc d'exprimer ces mesures dans le repère (uvw) :

$$\begin{cases} \omega_X = \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \omega_Y = \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \omega_Z = \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \\ a_X = -\sin \theta \\ a_Y = \cos \theta \cdot \sin \psi \\ a_Z = \cos \theta \cdot \cos \psi \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Les solutions proposées dans l'art antérieur pour opérer ce changement de repère, notamment celles divulguées par le brevet US7158118 qui emploie des micro-accéléromètres et micro-gyromètres MEMS, sont caractérisées par deux points principaux :

- une compensation de l'angle de roulis du dispositif par rapport au porteur afin de supprimer son influence sur le déplacement de l'élément

mobile à l'écran ; celle-ci s'effectue généralement grâce aux mesures accélérométriques ; en revanche, bien que l'angle de tangage entraîne des perturbations similaires à l'angle de roulis, il n'est pas compensé ;

- une résolution analytique des équations de changement de repère ; toutefois, dans ce cas, les mesures capteurs sont utilisées sans aucun traitement préalable et l'angle de roulis n'est déterminé qu'à partir des mesures accélérométriques ; le déplacement du curseur à l'écran peut donc être altéré lorsque des perturbations vibratoires sont présentes (environnement, tremblements de la main de faible amplitude équivalents à un bruit de mesure augmenté, capteur défaillant) ou lorsque des mouvements brusques sont réalisés. En effet, ces phénomènes sont directement mesurés par les accéléromètres mais ne sont pas pour autant corrigés par les équations analytiques, d'où une dégradation du résultat. Cette mise en œuvre est donc peu robuste.
- 15 Dans un mode privilégié de réalisation de l'invention, l'estimation des angles de roulis et de tangage est simultanée et se fait par une méthode de fusion de données, ce qui permet d'améliorer la robustesse du déplacement de l'élément mobile à l'écran vis-à-vis de l'orientation du dispositif par rapport au porteur. Deux classes de méthodes de résolution sont utilisables : les méthodes faisant appel aux observateurs ; celles utilisant un critère d'optimisation. Dans le premier groupe, un mode de réalisation privilégié fait appel à un filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter ou EKF). Dans un filtre de Kalman, on insère à la fréquence d'échantillonnage une innovation calculée à partir d'un vecteur de mesure qui vient corriger avec le gain du filtre le vecteur d'état estimé a priori par un modèle d'état. La version étendue du filtre de Kalman permet d'utiliser des modèles d'état et de mesures non-linéaires. La méthode est décrite plus en détail plus loin dans la description. L'emploi de cette technique de filtrage permet de fusionner les mesures accélérométriques et gyrométriques pour estimer les angles de roulis et de tangage. De cette manière, les erreurs présentes sur les mesures (bruits de mesure, perturbations,...) se compensent mutuellement. Il s'effectue ainsi une opération de lissage des mesures capteurs, ce qui aboutit à une solution optimale et donc robuste aux perturbations vibratoires. Ceci représente un avantage certain pour l'emploi du dispositif en créant un

déplacement de l'élément mobile à l'écran exempt de tout tremblement. Un exemple de méthode d'optimisation est donné plus loin dans la description.

La figure 5 représente un dispositif de pointage dans un mode de réalisation
5 comprenant un gyromètre trois axes. Comme indiqué plus haut, le capteur de vitesses angulaires peut disposer de deux ou trois axes. Dans le premier cas, il peut s'agir de deux capteurs mono-axe ou d'un capteur bi-axe. L'invention permet de calculer le déplacement de l'élément mobile dans une surface plane à partir des mouvements du pointeur pour des valeurs faibles
10 de l'angle de tangage (inférieur à 30°). Cette condition est remplie dans la plupart des applications de pointage, sauf peut-être dans des jeux où l'amplitude du mouvement est particulièrement importante. Le choix d'un gyromètre à deux axes de mesures est une solution plus simple et moins coûteuse à mettre en œuvre qu'une solution basée sur un gyromètre à trois
15 axes. Dans cette deuxième solution, le dispositif de pointage comprend par exemple un capteur MEMS accéléromètre tri-axes 20 et un capteur MEMS gyromètre tri-axes 30 composé de trois mono-axe ou d'un mono-axe et d'un bi-axe. Le troisième axe gyromètre permet de s'affranchir de la contrainte sur la valeur de l'angle de tangage. La compensation des angles de tangage et
20 roulis est totale, le déplacement du curseur à l'écran devient alors indépendant de l'orientation du dispositif sur le porteur. Un exemple d'application est présenté sur la figure 5. Les capteurs sont positionnés dans la partie haute du dispositif dont l'orientation est différente de la partie basse, tenue par le porteur. Les axes capteurs sont définis par le repère (X, Y, Z) .
25 Lorsque le porteur du dispositif effectue une rotation autour de l'axe w , le gyromètre, placé dans la partie inclinée du dispositif, détecte une rotation sur les axes X et Z , fonction de l'angle de tangage θ . La détermination de l'angle θ couplée à la connaissance des mesures de vitesse angulaire sur les axes X et Z permet alors d'en déduire la vitesse angulaire autour de l'axe w .
30 L'avantage d'une mesure gyromètre tri-axe peut également être mis en évidence sur un dispositif dont la forme ne permet pas de définir une orientation de référence, ce qui est par exemple le cas d'un dispositif sphérique dont aucun repère ne permet de déterminer l'orientation.

La figure 6 est un organigramme des traitements dans un mode de
35 réalisation de l'invention. Les traitements opérés se distinguent dans les

deux modes de réalisation indiqués ci-dessus (gyromètre à deux ou trois axes) uniquement par le fait que dans le premier cas la vitesse angulaire autour de l'axe X du dispositif de pointage est prise égale à zéro et donc supprimée des modèles et calculs. Dans le mode de réalisation représenté,

- 5 l'opération de compensation de torsion s'effectue en deux étapes, une étape 1 d'estimation des angles θ et ψ de pitch et de roll par un EKF et une étape 2 de calcul des composantes de vitesse angulaire ω_v , ω_w liées au déplacement de l'élément mobile par rapport au référentiel de l'utilisateur.
- L'EKF est la version non-linéaire du filtre de Kalman. Voir par exemple :
- 10 KALMAN R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 82,p.35-45, 1960 ; WELCH G., BISHOP G. An introduction to the Kalman Filter. *SIGGRAPH 2001*. La résolution du problème par cette famille de filtres est faite de manière statistique en minimisant la covariance d'erreur d'estimation. Par
- 15 conséquent, le filtre de Kalman, utilisé sous sa forme initiale, est une méthode de résolution optimale. Lorsque le problème est défini de manière non-linéaire (EKF), la propagation de la covariance de l'erreur des variables d'état est calculée grâce aux matrices jacobienues définies à la valeur courante des variables d'état. Une linéarisation est donc nécessaire à
- 20 chaque pas de calcul, ce qui peut être source d'instabilités numériques et par conséquent de divergence de la solution. Toutefois, l'EKF est le filtre le plus employé sur les procédés physiques étant donné sa robustesse et la qualité des résultats obtenus. La mise en œuvre de ce filtre est faite de manière privilégiée en utilisant la factorisation de type connu sous l'acronyme « QR »
- 25 de l'EKF proposée par Barraud (BARRAUD A. Outils d'analyse numérique pour l'automatique. Ed. Hermes – Lavoisier, Paris, 2002). Cette implémentation présente l'avantage d'offrir une meilleure stabilité des matrices de covariance que les mises en œuvre standard de l'EKF. Cet algorithme est rappelé de manière succincte ci-dessous.

- 30 On commence par initialiser un vecteur d'état qui comprend les variables représentatives de l'état du système :

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad \text{Eq. 3}$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] = P_{0-f}^T P_{0-f} \quad \text{Eq. 4}$$

Où

- 35 $\hat{x}_0$: vecteur d'état initial ($k = 0$)

P_0 : matrice de covariance liée à l'erreur d'état initiale

P_{0_f} : forme factorisée de la matrice P_0 de covariance de l'erreur d'état
($P_0 = P_{0\_f}^T \cdot P_{0\_f}$).

$E[x]$ est l'espérance mathématique

- 5 T est l'opérateur de transposition matricielle.

A partir des autres notations suivantes :

$\hat{x}_{k|k-1}$: vecteur d'état estimé à l'instant k à partir de l'instant k-1

$\hat{x}_{k|k}$: vecteur d'état estimé à l'instant k à partir de l'instant k

y_k : vecteur de mesures

- 10 $\hat{y}_k$: valeurs estimées du vecteur de mesures

f, h : fonctions du modèle d'états, du modèle de mesures

on définit ensuite deux modèles de prédiction de l'évolution du vecteur d'état et du vecteur de mesures :

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1})$$

$$\hat{y}_k = h(\hat{x}_{k|k-1})$$

- 15 On définit ensuite les corrections à appliquer au vecteur d'état en tenant compte des covariances des bruits de modélisation (Q) et des bruits de mesures (R) :

$$A_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1|k-1}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$C_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1|k-1}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$20 \quad M = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ P_f \cdot C^T & P_f \cdot A^T \\ 0 & Q_f \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 7}$$

$$HM = qr(M) = \begin{bmatrix} L & K \\ 0 & P_f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 8}$$

$$G = K^T \cdot L^{-T} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + G \cdot (y_k - \hat{y}_k) \quad \text{Eq. 10}$$

- 25 Où :

A_k : matrice jacobienne de la fonction f du modèle d'état calculée en $\hat{x}_{k-1|k-1}$

C_k : matrice jacobienne de la fonction h du modèle de mesure calculée en $\hat{x}_{k-1|k-1}$

HM : triangularisation de M par factorisation orthogonale

R_{f_i} : forme factorisée de la matrice R de covariance du bruit de mesure ($R=R_{f_i}^T.R_{f_i}$).

5 Q_{f_i} : forme factorisée de la matrice Q de covariance du bruit de modélisation ($Q=Q_{f_i}^T.Q_{f_i}$).

G est la grandeur que l'on qualifie généralement de gain dans un filtre de Kalman. On notera que les matrices sont en fait calculées à chaque étape d'échantillonnage, l'indice k ayant cependant été omis ci-dessus pour alléger les formules.

10 Dans un premier mode de réalisation, le vecteur d'état choisi pour résoudre le problème est : $x = [\theta \ \psi]$. Où θ et ψ sont respectivement les angles de pitch et de roll. Le vecteur de mesures est : $y = [a_x \ a_y \ a_z]$ (mesures du ou des accéléromètres). Les équations du modèle d'état sont obtenues à partir de l'expression de la vitesse angulaire :

$$15 \quad \omega = \begin{pmatrix} \dot{\psi} - \dot{\phi} \cdot \sin \theta \\ \dot{\phi} \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi + \dot{\theta} \cdot \cos \psi \\ \dot{\phi} \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi - \dot{\theta} \cdot \sin \psi \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 11}$$

L'angle ϕ représente ici l'angle de lacet permettant de passer du repère (uvw) au repère (XYZ). Or, étant donné la définition de ces repères, cet angle est nul et donc sa dérivée également.

$$20 \quad \text{L'expression de } \omega \text{ devient : } \omega = \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \cdot \cos \psi \\ -\dot{\theta} \cdot \sin \psi \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 12}$$

Il existe donc trois relations traduisant l'évolution de θ :

$$\dot{\theta} = -\frac{\omega_z}{\sin \psi} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\dot{\theta} = \frac{\omega_y}{\cos \psi} \quad \text{Eq. 14}$$

$$25 \quad \dot{\theta} = \alpha \cdot \sqrt{\omega_y^2 + \omega_z^2} \quad \text{Eq. 15}$$

avec $\alpha = \pm 1$.

Nous choisissons d'utiliser l'équation 15 qui permet de faire intervenir les deux ou trois mesures gyrométriques, ce qui renforce la robustesse du filtre
30 (utilisation conjointe des mesures gyromètres et accéléromètres). Le

paramètre α est alors déterminé avec l'une des deux autres expressions. Les mesures gyrométriques sont donc utilisées comme variables d'entrée du modèle.

Nous constatons par ailleurs que ω_X est égale à la dérivée de l'angle de roll.

5

Les équations du modèle d'état sont donc :

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \alpha \sqrt{\omega_Y^2 + \omega_Z^2} \\ \dot{\psi} = \omega_X \end{cases} \quad \text{Eq. 16}$$

Dans le mode de réalisation à capteur de vitesses angulaires selon deux axes, on prendra l'hypothèse que $\omega_X = 0$.

10 Les équations du modèle de mesure sont :

$$y = \text{mesures}_{\text{accéléro}} = R(\theta, \psi).G_0 \quad \text{Eq. 17}$$

$$\text{avec } R(\theta, \psi) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \theta \cdot \sin \psi & \cos \psi & \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \sin \theta \cdot \cos \psi & -\sin \psi & \cos \theta \cdot \cos \psi \end{pmatrix} \text{ et } G_0 = [0 \ 0 \ 1]$$

15 soit

$$y = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 18}$$

Enfin, on détermine les vitesses angulaires dans le repère de l'utilisateur par les relations :

$$\begin{cases} \omega_v = \cos \psi \cdot \omega_Y - \sin \psi \cdot \omega_Z \\ \omega_w = -\sin \theta \cdot \omega_X + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_Y + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_Z \end{cases} \quad \text{Eq. 19}$$

20 On détaille maintenant ci-dessous les différentes étapes de l'algorithme mis en œuvre dans le filtre de Kalman.

Dans l'étape d'initialisation, le vecteur d'état initial x_0 est pris égal à zéro ou à un état $[\theta_0 \ \psi_0]$ choisi a priori :

$$X_0 = [0 \ 0] \quad \text{ou} \quad X_0 = [\theta_0 \ \psi_0] \quad \text{Eq. 20}$$

25

On réalise ensuite l'estimation de la torsion au sein du filtre de Kalman étendu par la succession des calculs suivants :

- estimation a priori du vecteur d'état par intégration numérique du modèle dynamique choisi (dans l'équation suivante, T_e est la période d'échantillonnage) :

$$\hat{x}_k^- = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\psi}_k^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_{k-1} \\ \hat{\psi}_{k-1} \end{pmatrix} + T_e \cdot \begin{pmatrix} \alpha \cdot \sqrt{\omega_Y^2 + \omega_Z^2} \\ \omega_x \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 21}$$

- 5 - estimation a priori des mesures :

$$\hat{y}_k^- = \begin{cases} -\sin \hat{\theta}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \sin \hat{\psi}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \cos \hat{\psi}_k^- \end{cases} \quad \text{Eq. 22}$$

- calcul du gain G du filtre de Kalman (utilisation de la forme factorisée de type QR de l'EKF), défini par les équations 7, 8 et 9.
- correction de l'état estimé a priori :

$$10 \quad \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot \begin{pmatrix} a_{X,k} \\ a_{Y,k} \\ a_{Z,k} \end{pmatrix} - \hat{y}_k^- \quad \text{Eq. 23}$$

Les composantes ω_v et ω_w peuvent alors être calculées par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \omega_v = \cos \hat{\psi} \cdot \omega_Y - \sin \hat{\psi} \cdot \omega_Z \\ \omega_w = -\sin \hat{\theta} \cdot \omega_X + \cos \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\psi} \cdot \omega_Y + \cos \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\psi} \cdot \omega_Z \end{cases} \quad \text{Eq. 24}$$

- 15 Pour mettre en œuvre l'algorithme de l'EKF, il est nécessaire de déterminer une série de paramètres relatifs à la confiance accordée à l'état initial regroupés dans la matrice P_0 , au modèle d'état regroupés dans la matrice Q et au modèle de mesures regroupés dans la matrice R .

- Le réglage de ces paramètres s'effectue par essai-erreur. Toutefois, 20 quelques indications générales peuvent être données. La matrice P_0 traduit la confiance accordée à la valeur initiale de l'état. L'état initial est supposé nul, ce qui peut être assez éloigné de la réalité. Il ne faut donc pas lui accorder une confiance trop élevée, d'où une valeur de P_0 relativement élevée (de l'ordre de 10^{-2}).

- 25 La matrice Q traduit la confiance accordée au modèle d'état. L'imprécision de l'équation d'évolution de θ est issue de l'imprécision numérique lors de l'intégration des équations mais aussi du bruit des mesures gyrométriques. Les valeurs choisies pour les éléments de la matrice Q liés à θ sont donc légèrement supérieures à l'écart-type du bruit de mesures du gyromètre. Les

valeurs choisies pour les éléments liés à ψ seront plus faibles (rapport 10^{-2} environ).

La matrice R traduit la confiance accordée au modèle de mesures. L'imprécision de celui-ci est liée au bruit de mesures mais aussi aux
 5 accélérations propres mesurées par les accéléromètres (tremblements de la main, mouvements brusques,...). Les valeurs choisies pour cette matrice sont donc légèrement supérieures à l'écart-type du bruit de mesures de l'accéléromètre.

- 10 Plusieurs variantes de réalisation sont possibles. Pour certaines, il est avantageux de conserver un algorithme en deux étapes qui permet de minimiser le nombre de variables d'état du filtre de Kalman.

Une première variante de réalisation consiste à remplacer les angles de torsion θ et ψ par une formulation en quaternions de la même torsion. Cette
 15 variante présente l'avantage d'éviter les calculs des sinus et cosinus des angles de tangage et de roulis gourmands en puissance de calcul. De manière générale, un quaternion de rotation est défini par 4 éléments :

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} q_0 = \cos \frac{\alpha}{2} \\ \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{Eq. 25}$$

α étant l'angle de la rotation et $u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$ l'axe de cette rotation

On choisit le vecteur d'état suivant :

$$x = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$$

Le modèle d'état est le suivant :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 26}$$

$\otimes$ symbolisant la multiplication de deux quaternions.

$\omega_x = 0$ dans le cas d'un capteur de

vitesses angulaires à deux axes de mesures.

Le modèle de mesures est :

$$y = [a_x \ a_y \ a_z]$$

Les vitesses angulaires ω_v et ω_w sont ensuite obtenues par l'équation :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \omega_u \\ \omega_v \\ \omega_w \end{pmatrix} = q \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \otimes \bar{q} \quad \text{Eq. 27}$$

$\bar{q}$ étant le quaternion conjugué de q (ie si $q = q_0 + q_1 \cdot i + q_2 \cdot j + q_3 \cdot k$, $\bar{q}$

5 $= q_0 - q_1 \cdot i - q_2 \cdot j - q_3 \cdot k$).

Une deuxième variante d'algorithme à deux étapes supprime par rapport au premier mode de réalisation décrit le calcul direct des angles de tangage et de roulis. Cela permet également d'économiser du temps de calcul. Toutefois, dans cette variante, il n'y a pas de couplage des mesures gyrométriques et accélérométriques dans le filtre de Kalman. Il est donc possible que la résistance aux tremblements soit réduite. On utilise le vecteur d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \\ \sin \psi \\ \cos \psi \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 28}$$

Le modèle d'état est :

$$15 \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{c} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 29}$$

Et le modèle de mesures :

$$y = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ b.c \\ b.d \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 30}$$

Ces modèles s'appliquent indifféremment au dispositif à capteur de vitesses angulaires selon deux axes et selon trois axes.

20 Les vitesses angulaires ω_v et ω_w sont ensuite obtenues par les équations, dans le cas d'une mesure deux axes de la vitesse angulaire :

$$\begin{cases} \omega_v = d.\omega_Y - c.\omega_Z \\ \omega_w = b.c.\omega_Y + b.d.\omega_Z \end{cases} \quad \text{Eq. 31}$$

dans le cas d'une mesure trois axes de la vitesse angulaire :

$$\begin{cases} \omega_v = d.\omega_Y - c.\omega_Z \\ \omega_w = -a.\omega_X + b.c.\omega_Y + b.d.\omega_Z \end{cases} \quad \text{Eq. 32}$$

L'équation 32 se ramène à l'équation 31 dans le cas d'une mesure deux

5 axes en prenant ω_X égal à zéro comme vu dans les autres variantes.

Dans les modes de réalisation décrits ci-dessus, l'algorithme est décomposé en deux étapes principales, avec l'avantage de diminuer la dimension du vecteur d'état et de simplifier les calculs dans le filtre. Toutefois, une variante

10 vecteur de mesure deviennent alors :

$$\begin{aligned} x &= [\theta \ \psi \ \omega_u \ \omega_v \ \omega_w] \\ y &= [a_X \ a_Y \ a_Z \ \omega_X \ \omega_Y \ \omega_Z] \end{aligned}$$

15 $\omega_X = 0$ dans le cas d'un capteur de vitesses angulaires à deux axes de mesures. Dans cette variante, nous proposons de définir les angles θ et ψ comme étant les angles de la rotation traduisant le passage du repère (XYZ) au repère (uvw), rotation inverse au cas précédent. Ceci permet d'exprimer θ et ψ à partir du vecteur vitesse angulaire exprimé dans le repère (uvw). Les

20 variables d'état sont donc liées par les équations du modèle d'état rendant ainsi plus robuste cette formulation.

Le modèle d'état est :

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \alpha \sqrt{\omega_v^2 + \omega_w^2} \\ \dot{\psi} = \omega_u \\ \dot{\omega}_u = -\frac{1}{\tau} \cdot \omega_u \\ \dot{\omega}_v = -\frac{1}{\tau} \cdot \omega_v \\ \dot{\omega}_w = -\frac{1}{\tau} \cdot \omega_w \end{cases} \quad \text{Eq. 33}$$

25 où τ : constante de temps du modèle d'évolution de la vitesse angulaire (s).

Les modèles de mesures sont différents selon que l'on utilise les mesures de deux axes ou de trois axes de capteurs de vitesses angulaires. Dans le cas à deux axes :

$$5 \quad \begin{cases} a_X = -\sin \theta \cdot \cos \psi \\ a_Y = -\sin \psi \\ a_Z = \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \omega_Y = \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \omega_Z = \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{cases} \quad \text{Eq. 34}$$

Dans le cas à trois axes :

$$\begin{cases} a_X = -\sin \theta \cdot \cos \psi \\ a_Y = -\sin \psi \\ a_Z = \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \omega_X = \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \omega_Y = \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \omega_Z = \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{cases} \quad \text{Eq. 35}$$

Il est à noter que cette formulation entraîne une augmentation du nombre de paramètres de réglage. De plus, le choix du modèle d'évolution de la vitesse angulaire est généralement délicat puisqu'aucune loi physique ne permet de décrire « le mouvement aléatoire » du porteur du dispositif. Toutefois, ce mode de réalisation présente l'avantage de donner accès à une estimation de la composante ω_u de la vitesse angulaire sans utiliser nécessairement la mesure ω_X .

15

Le filtre de Kalman Etendu entre dans la catégorie des observateurs non-linéaires. Ce filtre est généralement employé du fait de sa robustesse et de la qualité des résultats obtenus. Toutefois, il peut être sujet à des problèmes d'instabilité numérique et à une absence de preuve de convergence. D'autres observateurs, tels les observateurs à grand gain ou encore les observateurs à horizon glissant, peuvent être utilisés, la convergence de ceux-ci pouvant être prouvée mathématiquement. Ces observateurs présentent également un nombre de paramètres de réglage restreint, d'où une facilité de mise en œuvre. Celle-ci pourra s'effectuer en utilisant les modèles d'état et de mesure décrits précédemment.

20

25

Les informations précédentes prises en compte dans les modes de réalisation de l'invention comprenant un EKF pour décrire les évolutions d'état et les modèles de mesure peuvent être également utilisées dans le cas des méthodes comprenant un opérateur non linéaire à minimisation d'un coût ou d'une erreur. Les modèles de mesure sont en général pris en compte dans le critère d'erreur qui globalement mesure la distance entre la mesure réelle à l'instant t et la mesure prédite par le modèle sachant l'estimation de l'état à l'instant t-1. Le modèle de l'évolution de l'état quant à lui est généralement mis à profit pour fixer la valeur de départ de ces méthodes de minimisation d'erreur. On applique à l'estimation d'état précédente les fonctions d'évolution, ce qui permet de prédire l'état suivant, donnée de départ pour la fonction d'optimisation.

Ainsi, la compensation des angles de torsion peut également être opérée par une méthode de résolution optimale ne faisant pas appel à un observateur. Parmi les méthodes d'optimisation de ce type on peut citer par exemple la descente de gradient, l'optimisation de Newton, ou une méthode d'optimisation dite quasi-Newton... Comme dans le cas du filtre de Kalman, deux formulations différentes peuvent être mises en œuvre :

- une optimisation conjointe des variables $\theta \psi \omega_u \omega_v \omega_w$,
- une estimation en deux étapes successives : estimation des angles $[\theta \psi]$ par optimisation puis calcul analytique de ω_v et ω_w en utilisant l'équation 19.

Dans ces deux cas, le critère d'optimisation est défini par :

$$f = \sum_{i=1}^n \left(\text{mesures}_{\text{capteurs}} - \text{mesures}_{\text{estimées}} \right)^T \cdot \left(\text{mesures}_{\text{capteurs}} - \text{mesures}_{\text{estimées}} \right) \quad \text{Eq. 36}$$

avec dans le cas de la première formulation (résolution en une étape),

$$\text{mesures}_{\text{capteurs}} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \text{ ou } \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 37}$$

$$mesures_{estimées} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 38}$$

et dans le cas de la seconde formulation (résolution en deux étapes),

$$mesures_{capteurs} = \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 39}$$

$$mesures_{estimées} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 40}$$

- 5 On notera que pour certaines applications où l'économie de puissance de calcul est plus importante que le lissage des tremblements et autres perturbations des mesures accélérométriques, une méthode de résolution analytique peut être préférée à une méthode de résolution optimale.

Dans ce cas, la résolution analytique se fait en deux étapes :

- 10 - Calcul des cos/sin des orientations θ et ψ

A partir de l'expression des mesures accélérométriques (Eq. 2), nous déduisons :

$$\begin{cases} \cos \theta = \pm \sqrt{a_Y^2 + a_Z^2} \\ \sin \theta = -a_X \end{cases} \quad \begin{cases} \cos \psi = \frac{a_Z}{\pm \sqrt{a_Y^2 + a_Z^2}} \\ \sin \psi = \frac{a_Y}{\pm \sqrt{a_Y^2 + a_Z^2}} \end{cases} \quad \text{Eq. 41}$$

Nous faisons l'hypothèse que l'angle θ est compris entre $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$, ce qui

- 15 permet de lever l'indétermination sur le signe de $\cos \theta$: $\cos \theta = +\sqrt{a_Y^2 + a_Z^2}$.

- Calcul de ω_v et ω_w

$$20 \quad \begin{pmatrix} \omega_u \\ \omega_v \\ \omega_w \end{pmatrix} = R^T \cdot \begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix} \quad \text{Eq.42}$$

$$\begin{cases} \omega_u = \cos \theta . \omega_x + \sin \theta . \sin \psi . \omega_y + \sin \theta . \cos \psi . \omega_z \\ \omega_v = \cos \psi . \omega_y - \sin \psi . \omega_z \\ \omega_w = -\sin \theta . \omega_x + \cos \theta . \sin \psi . \omega_y + \cos \theta . \cos \psi . \omega_z \end{cases} \quad \text{Eq. 43}$$

Les exemples décrits ci-dessus sont donnés à titre d'illustration de modes de réalisation de l'invention. Ils ne limitent en aucune manière le champ de

5 l'invention qui est défini par les revendications qui suivent.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de pointage (10) par un utilisateur sur un élément mobile dans une surface plane, ledit dispositif comprenant au moins un premier capteur de mesure (20) des vitesses angulaires (ω_y , ω_z) dudit dispositif autour d'au moins deux de ses axes orthogonaux (Y, Z), au moins un deuxième capteur de mesure (30) des déplacements linéaires dudit dispositif selon lesdits deux axes (Y, Z) et un troisième axe orthogonal (X), un module de calcul (40) des déplacements (y, z) à imprimer à l'élément mobile dans la surface plane en fonction des déplacements (X, Y, Z) du pointeur dans l'espace, ledit module de calcul comprenant un sous-module (50) de compensation de la torsion imprimée au dispositif de pointage mettant en œuvre un algorithme de fusion de données appliqué aux sorties des premier et deuxième capteurs, ledit dispositif de pointage étant caractérisé en ce que ledit algorithme de fusion de données comprend au moins un opérateur non linéaire qui satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état comprend au moins une représentation de la torsion choisie dans le groupe angles d'Euler, quaternions ; son modèle d'état comprend au moins une équation différentielle du premier ordre de ladite représentation ; son vecteur de mesures comprend au moins les mesures du deuxième capteur selon les axes X, Y, Z
2. Dispositif de pointage selon la revendication 1 caractérisé en ce que le premier capteur est un gyromètre à deux axes.
3. Dispositif de pointage selon la revendication 1 caractérisé en ce que le premier capteur est un gyromètre à trois axes.
4. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que le deuxième capteur est un accéléromètre à trois axes produisant des sorties a_x , a_y , a_z .

5. Dispositif de pointage selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'opérateur non linéaire met en œuvre un filtrage de Kalman étendu.

6. Dispositif de pointage selon la revendication 5 caractérisé en ce que le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) comprend au moins un angle de torsion (θ , ψ) du dispositif de pointage ; son modèle d'état comprend au moins l'expression de la vitesse angulaire (ω) dudit dispositif de pointage en fonction d'au moins un des angles de torsion (θ , ψ) ; son vecteur de mesures comprend au moins les sorties du deuxième capteur (a_x, a_y, a_z).

7. Dispositif de pointage selon la revendication 6 caractérisé en ce que le vecteur d'état du filtre de Kalman est initialisé à un état [$\theta_0 \ \psi_0$] choisi a priori et en ce que l'estimation a priori du vecteur d'état ($\hat{x}_k^-$) à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculé par la formule suivante :

$$\hat{x}_k^- = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_k^- \\ \hat{\psi}_k^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_{k-1} \\ \hat{\psi}_{k-1} \end{pmatrix} + T_e \cdot \begin{pmatrix} \alpha \cdot \sqrt{\omega_y^2 + \omega_z^2} \\ \omega_x \end{pmatrix} \text{ où } T_e \text{ est la période}$$

d'échantillonnage du filtre.

8. Dispositif de pointage selon la revendication 6 caractérisé en ce que l'estimation a priori des mesures ($\hat{y}_k^-$) à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculé par la formule suivante :

$$\hat{y}_k^- = \begin{pmatrix} -\sin \hat{\theta}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \sin \hat{\psi}_k^- \\ \cos \hat{\theta}_k^- \cdot \cos \hat{\psi}_k^- \end{pmatrix}$$

9. Dispositif de pointage selon la revendication 6 caractérisé en ce que le gain G du filtre de Kalman est calculé par les formules suivantes :

$$A_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1}|_{k-1}}$$

$$C_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k-1}|_{k-1}}$$

$$M = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ P_f \cdot C^T & P_f \cdot A^T \\ 0 & Q_f \end{bmatrix}$$

$$HM = qr(M) = \begin{bmatrix} L & K \\ 0 & P_f \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = K^T \cdot L^{-T}$$

- 5 10. Dispositif de pointage selon la revendication 6 caractérisé en ce que la correction de l'état estimé a priori à l'étape d'échantillonnage k du filtre de Kalman est calculé par la formule suivante :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot \begin{pmatrix} a_{X,k} \\ a_{Y,k} \\ a_{Z,k} \end{pmatrix} - \hat{y}_k^-$$

- 10 11. Dispositif de pointage selon la revendication >6 caractérisé en ce que les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \omega_v = \cos \hat{\psi} \cdot \omega_y - \sin \hat{\psi} \cdot \omega_z \\ \omega_w = -\sin \hat{\theta} \cdot \omega_x + \cos \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\psi} \cdot \omega_y + \cos \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\psi} \cdot \omega_z \end{cases}$$

- 15 12. Dispositif de pointage selon la revendication 6 caractérisé en ce que le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : la matrice P_0 de confiance accordée à la valeur initiale de l'état (x_0) comprend des valeurs choisies de l'ordre de 10^{-2} ; la matrice Q de confiance accordée à son modèle d'état comprend des valeurs choisies dont les plus élevées sont légèrement supérieures à l'écart-type du bruit des mesures du premier capteur ; la matrice R de confiance accordée au modèle de mesures du filtre de Kalman comprend des valeurs choisies dont les plus élevées sont légèrement supérieures à l'écart-type du bruit des mesures du deuxième capteur.

- 25 13. Dispositif de pointage selon la revendication 5 caractérisé en ce que le filtre de Kalman satisfait au moins une

des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) est un quaternion de la forme $[\cos\alpha/2, \sin \alpha/2 u_1, \sin \alpha/2 u_2, \alpha/2 u_3]$; son modèle d'état est de la forme :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} ;$$

5 son vecteur de mesures comprend au moins les sorties du deuxième capteur (a_x, a_y, a_z).

14. Dispositif de pointage selon la revendication 13 caractérisé en ce que les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par la

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \omega_u \\ \omega_v \\ \omega_w \end{pmatrix} = q \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \otimes \bar{q}$$

15 15. Dispositif de pointage selon la revendication 5 caractérisé en ce que le filtre de Kalman satisfait au moins une des conditions suivantes : son vecteur d'état (x) est de la forme $[a, b, c, d] = [\sin\theta, \cos\theta, \sin \psi, \cos \psi]$; son modèle d'état est de la forme :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{c} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} ;$$

son modèle de mesures est de la forme :

$$y = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ b.c \\ b.d \end{bmatrix}$$

20 16. Dispositif de pointage selon la revendication 15 caractérisé en ce que les composantes ω_v et ω_w de la vitesse angulaire dans le repère de l'utilisateur sont calculés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \omega_v = d.\omega_y - c.\omega_z \\ \omega_w = -a.\omega_x + b.c.\omega_y + b.d.\omega_z \end{cases}$$

17. Dispositif de pointage selon la revendication 5 caractérisé en ce que le vecteur d'état du filtre (x) de Kalman est de la forme $[\theta, \psi, \omega_u, \omega_v, \omega_w]$ et en ce que son vecteur de mesures est de la forme $[a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]$.

5 18. Dispositif de pointage selon la revendication 17 caractérisé en ce que le modèle d'état du filtre de Kalman est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \alpha \sqrt{\omega_v^2 + \omega_w^2} \\ \dot{\psi} = \omega_u \\ \dot{\omega}_u = -\frac{1}{\tau} \omega_u \\ \dot{\omega}_v = -\frac{1}{\tau} \omega_v \\ \dot{\omega}_w = -\frac{1}{\tau} \omega_w \end{cases}$$

10 Où τ est la constante de temps du modèle d'évolution de la vitesse angulaire et en ce que le modèle de mesures est de l'une des formes suivantes :

$$\begin{cases} a_x = -\sin \theta \cos \psi \\ a_y = -\sin \psi \\ a_z = \cos \theta \cos \psi \\ \omega_x = \sin \theta \sin \psi \omega_u + \cos \psi \omega_v + \cos \theta \sin \psi \omega_w \\ \omega_y = \sin \theta \cos \psi \omega_u - \sin \psi \omega_v + \cos \theta \cos \psi \omega_w \end{cases}$$

ou

$$\begin{cases} a_x = -\sin \theta \cos \psi \\ a_y = -\sin \psi \\ a_z = \cos \theta \cos \psi \\ \omega_x = \cos \theta \omega_u - \sin \theta \omega_w \\ \omega_y = \sin \theta \sin \psi \omega_u + \cos \psi \omega_v + \cos \theta \sin \psi \omega_w \\ \omega_z = \sin \theta \cos \psi \omega_u - \sin \psi \omega_v + \cos \theta \cos \psi \omega_w \end{cases}$$

15 19. Dispositif de pointage selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'opérateur non linéaire met en œuvre une méthode de résolution optimale.

20 20. Dispositif de pointage selon la revendication 1 caractérisé en ce que la méthode de résolution optimale est une optimisation ayant pour critère la fonction :

$$f = \sum_{i=1}^n (mesures_{capteurs} - mesures_{estimées})^T \cdot (mesures_{capteurs} - mesures_{estimées})$$

Avec un couple de vecteurs ($mesures_{capteurs}$, $mesures_{estimées}$) choisi dans le groupe

$$5 \quad (mesures_{capteurs} = \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \\ 0 \text{ ou } \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix},$$

$$mesures_{estimées} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \\ \cos \theta \cdot \omega_u - \sin \theta \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_u + \cos \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \omega_w \\ \sin \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_u - \sin \psi \cdot \omega_v + \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \omega_w \end{bmatrix}),$$

$$(mesures_{capteurs} = \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix}, mesures_{estimées} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \cdot \sin \psi \\ \cos \theta \cdot \cos \psi \end{bmatrix})$$

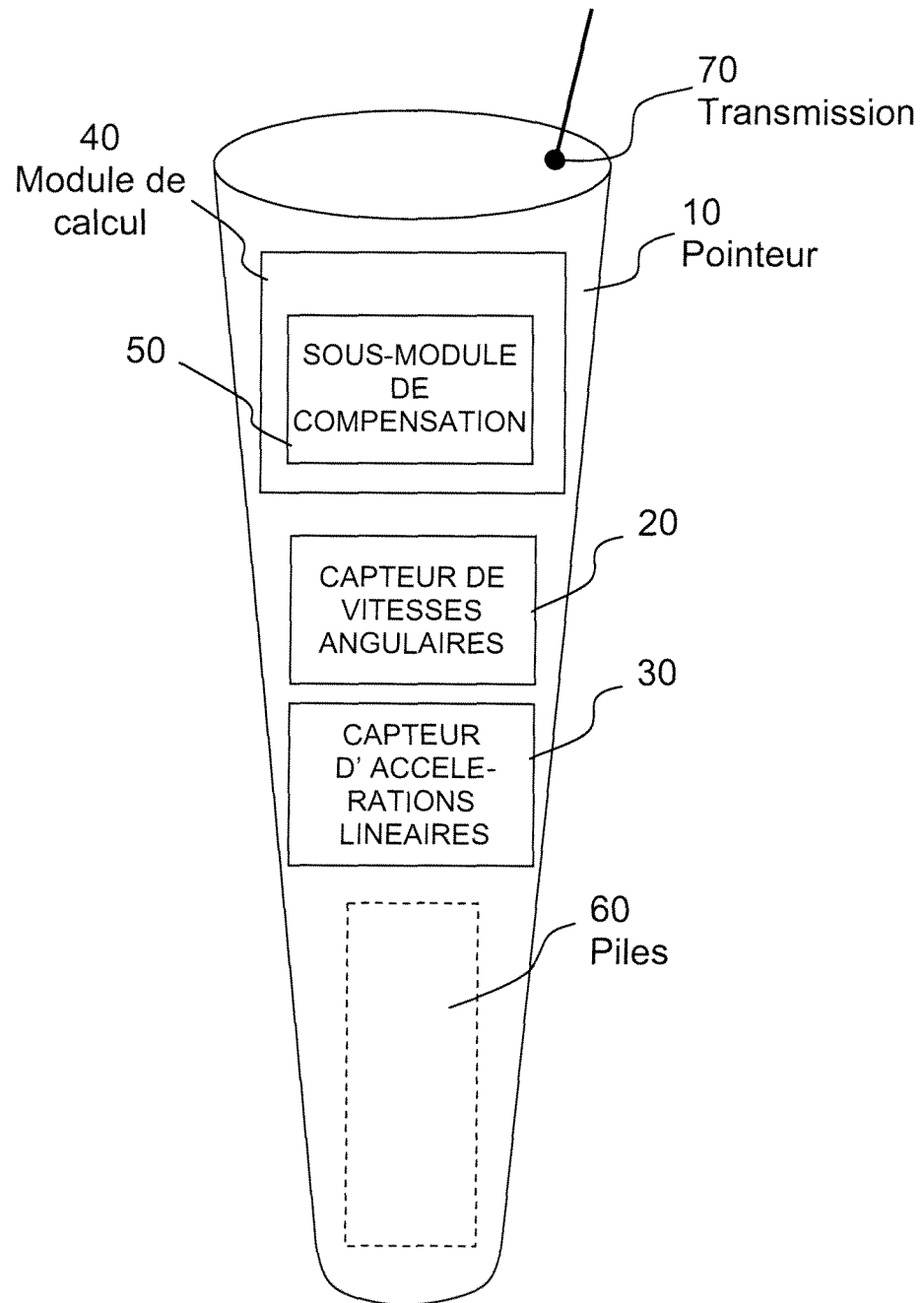
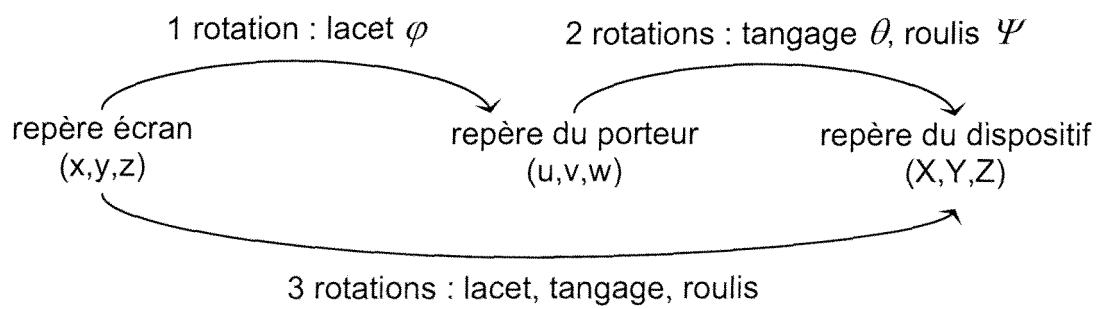
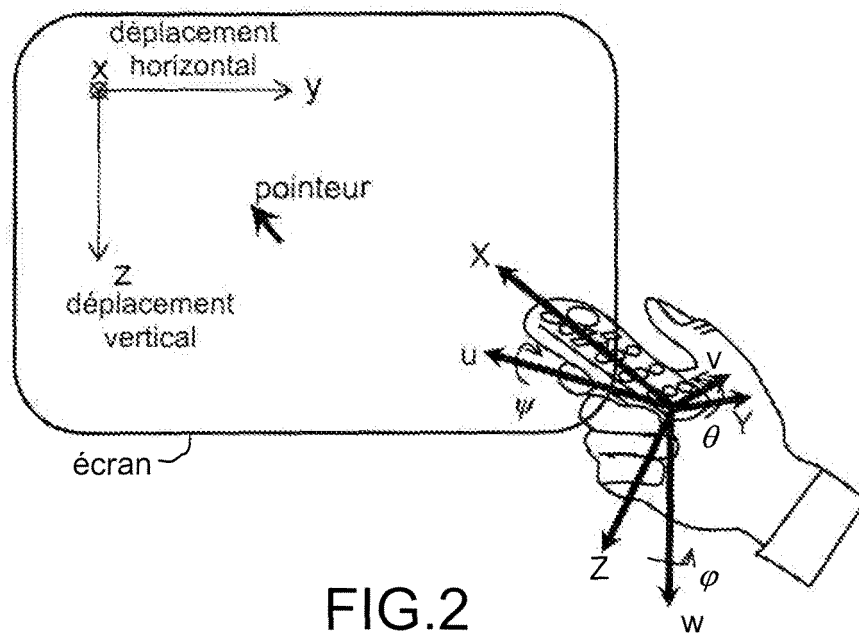


FIG.1



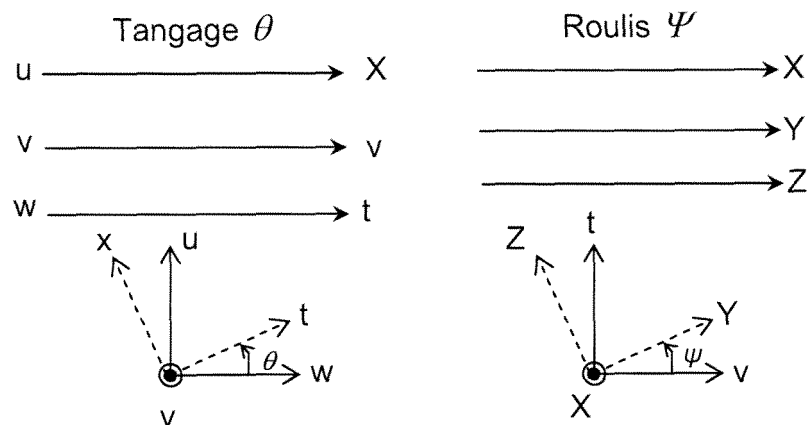


FIG.4

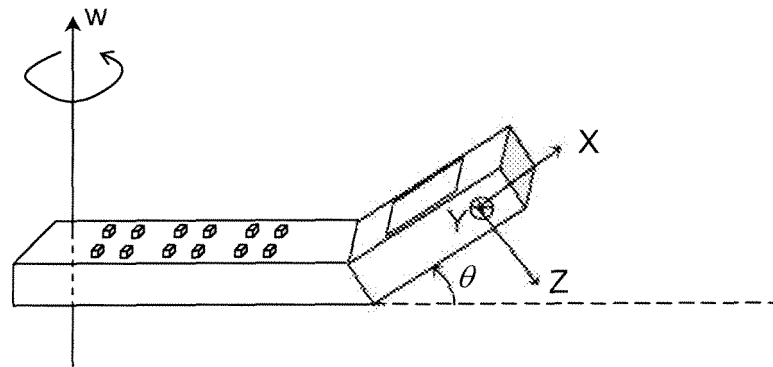


FIG.5

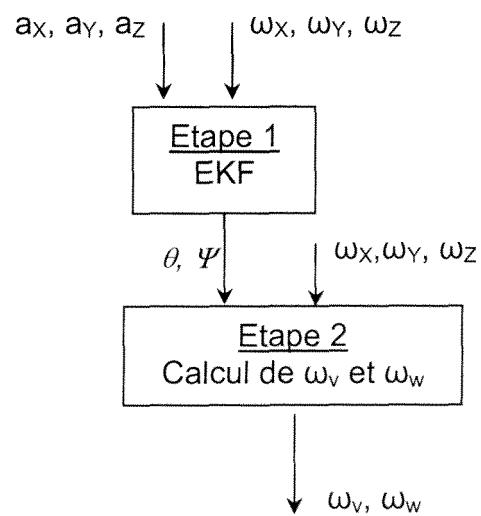


FIG.6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2009/058024

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G06F3/033 G01C21/16

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G06F G01C G01S H04N

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

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

EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 1 870 670 A (MICROINFINITY INC [KR]; MICROTECH SYSTEM INC [KR]) 26 December 2007 (2007-12-26) paragraphs [0006] - [0013], [0017] - [0019], [0022], [0025], [0027] - [0045], [0060] - [0069] -----	1-20
X	EP 1 441 279 A (MICROSOFT CORP [US]) 28 July 2004 (2004-07-28) paragraphs [0019] - [0024], [0032], [0040], [0050], [0057] - [0065]; figures 2,4 -----	1-20
X	US 2007/257885 A1 (LIBERTY MATTHEW G [US]) 8 November 2007 (2007-11-08) abstract; figures 3,4,6A-6D paragraphs [0034] - [0049], [0076], [0081] ----- -/--	1-4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *G* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 août 2009

Date of mailing of the international search report

14/08/2009

Name and mailing address of the ISA/
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Tonet, Oliver

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2009/058024

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2005/240347 A1 (YANG YUN-CHUN [US]) 27 October 2005 (2005-10-27) paragraphs [0039], [0102] - [0113], [0116] - [0124]; figures 1,4-6 -----	2-18
A	WELCH G ET AL: "An introduction to the Kalman filter" COMPUTER GRAPHICS. SIGGRAPH 2001. CONFERENCE PROCEEDINGS. LOS ANGELES, CA, AUG. 12 - 17, 2001; [COMPUTER GRAPHICS PROCEEDINGS. SIGGRAPH], NEW YORK, NY : ACM, US, 12 August 2001 (2001-08-12), pages 1-49, XP002318767 ISBN: 978-1-58113-374-5 cited in the application page 19 - page 35 page 40 -----	5-18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2009/058024

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 1870670	A	26-12-2007	CN 101093167 A	26-12-2007
			JP 2008004096 A	10-01-2008
			US 2007299626 A1	27-12-2007
EP 1441279	A	28-07-2004	BR 0306022 A	17-05-2005
			CN 1517944 A	04-08-2004
			JP 2004227563 A	12-08-2004
			KR 20040069176 A	04-08-2004
			US 2004140962 A1	22-07-2004
US 2007257885	A1	08-11-2007	NONE	
US 2005240347	A1	27-10-2005	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2009/058024

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. G06F3/033 G01C21/16

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

G06F G01C G01S H04N

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	EP 1 870 670 A (MICROINFINITY INC [KR]; MICROTECH SYSTEM INC [KR]) 26 décembre 2007 (2007-12-26) alinéas [0006] - [0013], [0017] - [0019], [0022], [0025], [0027] - [0045], [0060] - [0069]	1-20
X	EP 1 441 279 A (MICROSOFT CORP [US]) 28 juillet 2004 (2004-07-28) alinéas [0019] - [0024], [0032], [0040], [0050], [0057] - [0065]; figures 2,4	1-20
X	US 2007/257885 A1 (LIBERTY MATTHEW G [US]) 8 novembre 2007 (2007-11-08) abrégé; figures 3,4,6A-6D alinéas [0034] - [0049], [0076], [0081]	1-4
	-/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *Z* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

3 août 2009

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

14/08/2009

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Tonet, Oliver

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2009/058024

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 2005/240347 A1 (YANG YUN-CHUN [US]) 27 octobre 2005 (2005-10-27) alinéas [0039], [0102] - [0113], [0116] - [0124]; figures 1,4-6 -----	2-18
A	WELCH G ET AL: "An introduction to the Kalman filter" COMPUTER GRAPHICS. SIGGRAPH 2001. CONFERENCE PROCEEDINGS. LOS ANGELES, CA, AUG. 12 - 17, 2001; [COMPUTER GRAPHICS PROCEEDINGS. SIGGRAPH], NEW YORK, NY : ACM, US, 12 août 2001 (2001-08-12), pages 1-49, XP002318767 ISBN: 978-1-58113-374-5 cité dans la demande page 19 - page 35 page 40 -----	5-18

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2009/058024

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 1870670	A	26-12-2007	CN 101093167 A	26-12-2007
			JP 2008004096 A	10-01-2008
			US 2007299626 A1	27-12-2007

EP 1441279	A	28-07-2004	BR 0306022 A	17-05-2005
			CN 1517944 A	04-08-2004
			JP 2004227563 A	12-08-2004
			KR 20040069176 A	04-08-2004
			US 2004140962 A1	22-07-2004

US 2007257885	A1	08-11-2007	AUCUN	

US 2005240347	A1	27-10-2005	AUCUN	
