

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 29.03.10.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 30.09.11 Bulletin 11/39.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public — FR.

72 Inventeur(s) : LESECQ SUZANNE.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public.

74 Mandataire(s) : BREVINNOV.

54 PROCÉDE ET SYSTEME DE CALIBRATION, SUPPORT D'ENREGISTREMENT POUR CE PROCÉDE.

57 Ce procédé de calibration des coefficients d'un observateur d'une variable d'état x_k comporte:
- la mesure (50) d'une variable z_k d'un système physique à N instants différents, cette variable z_k étant fonction de la variable d'état x_k ,
- la détermination (54) d'un vecteur p de coefficients qui minimise le critère suivant en respectant un ensemble prédéterminé Δ de contraintes:

$$f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \Phi(\hat{x}_k, p)\|^2$$

où:

•

\hat{x}_k est l'estimation de la variable x_k construite par l'observateur calibré avec les coefficients du vecteur p,
• Φ est une fonction connue qui relie l'estimation

\hat{x}_k à une estimation

\hat{z}_k de la variable z_k ,
• $\|\dots\|^2$ est une norme, et
• la ou les contraintes de l'ensemble Δ imposent que la trajectoire de la variable z_k soit comprise dans un couloir d'incertitude situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation

\hat{z}_k au moins pour la majorité des instants k.

40
42
44
46
50
52
54
56
58



PROCEDE ET SYSTEME DE CALIBRATION, SUPPORT D'ENREGISTREMENT
POUR CE PROCEDE

[001] L'invention concerne un procédé et un système de calibration des coefficients
5 d'un observateur d'une variable d'état x_k d'un système physique. L'invention
concerne également un support d'enregistrement pour la mise en œuvre de ce
procédé.

[002] Un observateur permet d'estimer la variable d'état x_k à partir de mesures
 y_k de grandeurs physiques de ce système, où l'indice k identifie l'instant de mesure.

10 [003] Il est connu de calibrer les coefficients d'un observateur par expérimentations
successives de différents jeux de coefficients jusqu'à ce qu'un jeu de coefficients
permette d'obtenir le fonctionnement souhaité de cet observateur. Typiquement, le
comportement souhaité de l'observateur est :

- une convergence rapide vers une estimation \hat{x}_k la plus exacte possible de la
15 variable x_k , et
- une stabilité élevée.

[004] Cette calibration par expérimentation relève d'une démarche heuristique. Elle
est souvent longue et il est difficile d'être sûr que la meilleur calibration possible de
l'observateur a été obtenue.

20 [005] Pour résoudre ce problème, d'autres procédés alternatifs ont été proposés.
Par exemple, la demande de brevet CA 2 226 282 décrit un procédé de calibration
des coefficients d'un filtre de Kalman à l'aide d'un réseau de neurones. Toutefois, ces
procédés alternatifs sont souvent aussi complexes à mettre en œuvre que le procédé
par expérimentation.

25 [006] L'invention vise donc à proposer un procédé de calibration plus simple à
mettre en œuvre.

[007] Ainsi, elle a pour objet un procédé de calibration des coefficients d'un
observateur comportant :

- la mesure d'une variable z_k du système physique à N instants différents, cette
30 variable z_k étant fonction de la variable d'état x_k ,
- la détermination d'un vecteur p de coefficients qui minimise le critère suivant en
respectant un ensemble prédéterminé Δ de contraintes :

$$\left\{ f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \phi(\hat{x}_k, p)\|^2 \right\}$$

35 où :

- \hat{x}_k est l'estimation de la variable x_k construite par l'observateur calibré avec
les coefficients du vecteur p à l'instant k,

- ϕ est une fonction connue qui relie l'estimation \hat{x}_k à une estimation \hat{z}_k de la variable z_k ,
- $\|\dots\|^2$ est une norme de la différence entre z_k et $\phi(\hat{x}_k, p)$, et
- la ou les contraintes de l'ensemble Δ imposent que la trajectoire de la variable z_k soit comprise dans un couloir d'incertitude situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k au moins pour la majorité des instants k .

[008] Le procédé ci-dessus permet de déterminer plus simplement et sans recours à différentes expérimentations les coefficients permettant un bon fonctionnement de l'observateur. De plus, les coefficients ainsi déterminés permettent de garantir que le critère $f(p)$ a été minimisé.

[009] Enfin, l'utilisation de l'ensemble Δ permet de tenir compte du fait qu'il existe une incertitude sur l'estimation \hat{z}_k . Le fait de tenir compte de cette incertitude lors de la détermination du vecteur p qui minimise le critère $f(p)$ permet d'obtenir une meilleure calibration que si cette incertitude n'était pas prise en compte. En particulier, des solutions aberrantes qui pourraient minimiser le critère $f(p)$ sont éliminées.

[0010] Les modes de réalisation de ce procédé de calibration peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- l'ensemble Δ comprend une contrainte qui impose que la variable z_k soit comprise entre $\hat{z}_k - a$ et $\hat{z}_k + b$, où a et b sont des constantes positives prédéterminées;
- les constantes a et b sont proportionnelles à un écart-type $\sigma_{\hat{z}_k}$ représentatif de l'incertitude sur l'estimation \hat{z}_k ;
- l'ensemble Δ de contraintes comprend une contrainte qui impose que la moyenne des écarts entre la variable z_k et son estimation \hat{z}_k soit inférieure à un seuil prédéterminé S_1 ;
- le seuil S_1 est fonction de l'incertitude sur l'estimation de \hat{z}_k ;
- l'observateur est un filtre de Kalman, un filtre de Kalman étendu ou un filtre de Kalman non parfumé (ou « Unscented Kalman Filter » en anglais) et les coefficients à calibrer sont les coefficients des matrices de covariances R et Q de ce filtre;
- les matrices R et Q sont choisies diagonales.

[0011] Ces modes de réalisation du procédé de calibration présentent en outre les avantages suivants :

- imposer que la variable z_k soit comprise entre $\hat{z}_k - a$ et $\hat{z}_k + b$ réduit l'espace de recherche dans lequel le vecteur p doit être recherché ce qui accélère l'exécution de ce procédé ;
- utiliser des constantes a et b proportionnelles à l'écart-type $\sigma_{\hat{z}_k}$ améliore la calibration,

– utiliser une contrainte qui impose que la moyenne des écarts en valeur absolue entre la variable z_k et son estimation \hat{z}_k soit inférieure au seuil S_1 relâche les contraintes imposées ce qui facilite la détermination d'un vecteur p ;

– utiliser un seuil S_1 qui est fonction de l'incertitude sur l'estimation de \hat{z}_k améliore la calibration ;

– choisir des matrices R et Q diagonales décroît le nombre de coefficients à déterminer ce qui facilite la calibration.

[0012] L'invention a également pour objet un support d'enregistrement d'informations comportant des instructions pour la mise en œuvre du procédé ci-dessus lorsque ces instructions sont exécutées par un ordinateur électronique programmable.

[0013] L'invention a également pour objet un système de calibration des coefficients d'un observateur d'une variable d'état x_k d'un système physique à partir de mesures de grandeurs physiques de ce système, où l'indice k identifie l'instant de mesure, ce système comportant :

– au moins un capteur apte à mesurer une variable z_k du système physique à N instants différents, cette variable z_k étant fonction de la variable d'état x_k , et

– un ordinateur apte à déterminer un vecteur p de coefficients qui minimise le critère suivant en respectant un ensemble prédéterminé Δ de contraintes :

$$f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \phi(\hat{x}_k, p)\|^2$$

où :

- \hat{x}_k est l'estimation de la variable x_k construite par l'observateur calibré avec les coefficients du vecteur p à l'instant k ,
- ϕ est une fonction connue qui relie l'estimation \hat{x}_k à une estimation \hat{z}_k de la variable z_k ,
- $\|\dots\|^2$ est une norme de la différence entre z_k et $\phi(\hat{x}_k, p)$, et
- la ou les contraintes de l'ensemble Δ impose que la trajectoire de la variable z_k soit comprise dans un couloir d'incertitude situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k au moins pour la majorité des instants k .

[0014] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :

- la figure 1 est une illustration schématique de l'architecture d'un système de localisation incluant un observateur et d'un système de calibration de cet observateur,
- la figure 2 est un organigramme d'un procédé de calibration de l'observateur du système de la figure 1, et

– la figure 3 est un graphe illustrant la trajectoire d'une variable z_k et de son estimation \hat{z}_k .

[0015] Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne seront pas décrites en détail.

5 [0016] Ici, une trajectoire désigne les variations au cours du temps d'une variable. La variable qui varie au cours du temps peut être quelconque. En particulier, cette variable n'est pas nécessairement une position dans l'espace. Par exemple, il peut s'agir d'une température ou de toute autre grandeur physique qui varie au cours du temps.

10 [0017] La figure 1 représente un système physique, c'est-à-dire ici un objet 4, et un système 6 de localisation de cet objet 4 dans un référentiel 8.

[0018] Par exemple, l'objet 4 est une sonde ou un cathéter introduit dans un corps humain. L'objet 4 est mobile dans le référentiel 8.

15 [0019] Le référentiel 8 est un référentiel fixe présentant trois axes orthonormés X, Y et Z.

[0020] La localisation de l'objet 4 dans le référentiel 8 consiste à trouver sa position x_p, y_p, z_p et son orientation θ_x, θ_y et θ_z . Les angles θ_x, θ_y et θ_z représentent l'orientation de l'objet 4, respectivement, par rapport aux axes X, Y et Z.

20 [0021] Pour localiser l'objet 4, le système 6 comprend ici des sources de champs magnétiques et des capteurs de champ magnétique dont certains sont fixes dans le référentiel 8 et d'autres sont fixés sans aucun degré de liberté à l'objet 4 à localiser. Ici, un capteur 10 de champ magnétique est fixé sans aucun degré de liberté à l'objet 4. Le capteur 10 est par exemple un capteur triaxe, c'est-à-dire un capteur apte à mesurer la projection du champ magnétique sur trois axes de mesure non colinéaires. Un tel capteur mesure la direction du champ magnétique. De plus, généralement, ce capteur mesure également l'amplitude du champ magnétique.

25 [0022] Par exemple, les axes de mesures sont orthogonaux entre eux. Ces axes sont solidaires de l'objet 4.

30 [0023] Ce capteur 10 est raccordé par l'intermédiaire d'une liaison filaire souple à une unité 12 de traitement.

[0024] L'unité 12 est également raccordée à trois sources 14 à 16 de champ magnétique. Ces sources sont par exemple des sources triaxes de champ magnétique. Une source triaxe de champ magnétique émet un champ magnétique le long de trois axes d'émission non colinéaires entre eux. Par exemple, une telle source est formée de plusieurs émetteurs monoaxes de champ magnétique alignés, respectivement, sur chacun des axes d'émission de la source. L'émetteur monoaxe émet préférentiellement le champ magnétique le long d'un seul axe. Par exemple, il s'agit d'une bobine dont les spires sont enroulées autour d'un même axe d'émission. Dans ce cas, l'axe d'émission est confondu avec l'axe d'enroulement des spires.

[0025] Ici, les sources 14 à 16 sont identiques les unes aux autres. Ces sources sont fixes dans le référentiel 8.

[0026] L'unité 12 de traitement alimente les sources 14 à 16 en courant alternatif pour générer le champ magnétique mesuré par le capteur 10. L'unité 12 acquiert également les mesures du champ magnétique réalisées par le capteur 10.

[0027] L'unité 12 est équipée d'un observateur 18 qui localise l'objet 4 dans le référentiel 8 à partir des mesures acquises. Ici, l'observateur 18 détermine la position et l'orientation de l'objet 4 en résolvant un système d'équations. Ce système d'équations est obtenu en modélisant les interactions magnétiques entre les sources 14 à 16 et le capteur 10. Dans ce système d'équations, la position x_p , y_p et z_p et l'orientation θ_x , θ_y et θ_z de l'objet 4 sont les inconnues alors que les valeurs des autres paramètres sont obtenues à partir des mesures réalisées par le capteur 10. Plus d'informations sur de tels systèmes d'équations peuvent par exemple être trouvées dans la demande de brevet EP 1 502 544.

[0028] Ici, l'observateur 18 est un filtre de Kalman.

[0029] Cet observateur 18 construit une estimation \hat{x}_k d'une variable d'état x_k à partir d'une mesure y_k . La variable x_k est un vecteur contenant la position x_p , y_p , z_p de l'objet 4 et son orientation θ_x , θ_y et θ_z dans le référentiel orthonormé 8. La mesure y_k est un vecteur de mesures comprenant les mesures réalisées selon les trois axes de mesure du capteur 10 à un instant k .

[0030] Les équations du filtre de Kalman de l'observateur 18 sont les suivantes :

$$(1) \quad \begin{cases} \hat{x}_{k+1/k} = F_k \hat{x}_k \\ P_{k+1/k} = F_k P_{k/k} F_k^T + Q_k \end{cases}$$

$$(2) \quad \begin{cases} \hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1/k}) \\ P_{k+1/k+1} = P_{k+1/k} - K_{k+1} C_{k+1} P_{k+1/k} \end{cases}$$

où :

25 - $\hat{x}_{k+1/k}$ est l'estimation de la variable x_k obtenue uniquement à partir des données disponibles à l'instant k ,

- F_k est la matrice qui relie l'estimation \hat{x}_k à l'estimation $\hat{x}_{k+1/k}$,

- $P_{k/k}$ est la matrice d'estimation de la covariance des erreurs sur l'estimation \hat{x}_k ,

30 - Q_k est une matrice de covariance du bruit de l'équation du modèle qui contient entre autres les erreurs de modélisation,

- $\hat{x}_{k+1/k+1}$ est l'estimation \hat{x}_{k+1} corrigée à l'instant $k+1$ à partir des mesures réalisées à l'instant $k+1$,

- y_k est le vecteur des mesures réalisées à l'instant k ,

- C_k est la matrice qui relie la variable x_k à la mesure y_k ,

– $P_{k+1/k+1}$ est la matrice de covariance de l'erreur de l'estimation \hat{x}_k corrigée à partir des mesures y_k ,

– K_{k+1} est le gain du filtre de Kalman.

[0031] La matrice F_k est par exemple obtenue en modélisant les interactions magnétiques entre les sources 14 à 16 et le capteur 10 à l'aide des lois de l'électromagnétisme.

[0032] Le gain K_{k+1} du filtre de Kalman est donné par la relation suivante :

$$(3) \quad K_{k+1} = P_{k+1/k} C_{k+1}^T [C_{k+1} P_{k+1/k} C_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1}$$

où R_{k+1} est la matrice de covariance du bruit sur la mesure y_k .

[0033] Les équations du filtre de Kalman données sont classiques et ne sont donc pas décrites ici plus en détail.

[0034] L'utilisation d'un filtre de Kalman permet d'obtenir une estimation précise de la position et de l'orientation de l'objet 4. Toutefois, avant cela, les matrices R_k et Q_k doivent être calibrées c'est-à-dire que les valeurs de leurs coefficients doivent être déterminées. Pour simplifier, on suppose ici que les valeurs de ces coefficients sont constantes. Les matrices R_k et Q_k sont donc également notées R et Q par la suite.

[0035] Ici, on note p_R et p_Q les jeux de coefficients, respectivement, des matrices R et Q à déterminer.

[0036] Ces jeux p_R et p_Q , une fois le filtre de Kalman calibré, sont enregistrés dans une mémoire 20 raccordée à l'unité 12 de manière à pouvoir être utilisés par l'observateur 18 pour estimer la position de l'objet 4.

[0037] La figure 1 représente également un système 30 de calibration de l'observateur 18. Ce système détermine automatiquement les jeux p_R et p_Q de coefficients des matrices R et Q de l'observateur 18.

[0038] A cet effet, le système 30 est équipé d'un ou plusieurs capteurs 32 qui mesurent une variable z_k . Cette variable z_k est une variable dont la valeur est fonction de la variable x_k . Plus précisément, la variable z_k est reliée à la variable x_k par une fonction ϕ connue. Cette fonction ϕ peut être une fonction linéaire ou au contraire une fonction non linéaire. Par exemple, le capteur 32 mesure l'accélération suivant les axes X, Y et Z de l'objet 4. Dans ce cas, le capteur 32 est formé de plusieurs accéléromètres.

[0039] Le capteur 32 peut, dans un autre mode de réalisation, mesurer directement la position de l'objet 4 avec d'autres capteurs que ceux utilisés pour réaliser la mesure y_k . Par exemple, le capteur 32 peut comporter à cet effet plusieurs caméras ou d'autres capteurs et d'autres sources de champ magnétique pour mesurer la position de l'objet 4. Dans ce cas particulier, la fonction ϕ est la fonction identité.

[0040] Le système 30 comporte également un calculateur 34 capable d'acquérir les mesures du capteur 32. Ce calculateur 34 est également apte à calibrer

automatiquement l'observateur 18 en déterminant les jeux de coefficients p_R et p_Q à partir des mesures réalisées par le capteur 32.

[0041] Dans le cas particulier représenté sur la figure 1, le calculateur 34 est raccordé à la mémoire 20 de manière à pouvoir enregistrer directement dans celle-ci
5 les jeux de coefficients p_R et p_Q .

[0042] Le calculateur 34 est réalisé à partir d'au moins un calculateur électronique programmable apte à exécuter des instructions enregistrées sur un support d'enregistrement d'informations. Ici, le calculateur 34 est raccordé à une mémoire 36 et cette mémoire 36 contient les instructions nécessaires pour l'exécution du procédé
10 de la figure 2.

[0043] Le fonctionnement du système 30 de calibration va maintenant être décrit plus en détail en regard du procédé de la figure 2 et du graphe de la figure 3.

[0044] Initialement, lors d'une étape 40, la relation ϕ qui relie la variable z_k à la variable x_k est établie. Par exemple, à cet effet, les lois de la physique sont utilisées.

15 [0045] Ensuite, lors d'une étape 42, le nombre de coefficients à utiliser pour calibrer l'observateur 18 est déterminé. Pour cela, des connaissances sur le fonctionnement physique du système 6 sont utilisées. De plus, on applique lors de cette étape le principe de parcimonie qui consiste à limiter autant que possible le nombre de coefficients à calibrer.

20 [0046] Par exemple, dans le cas particulier décrit ici, on admet que les mesures réalisées sur chacun des axes de mesure sont indépendantes les unes des autres. Dans ces conditions, la matrice R est prise diagonale. De même, on suppose que les erreurs sur l'équation d'état sont indépendantes. Dans ces conditions, la matrice Q est prise diagonale. Elles ont donc la forme suivante :

25 (7) $R = \text{diag}(p_R^1, \dots, p_R^l), p_R^i \geq 0, i = 1:l$

(8) $Q = \text{diag}(p_Q^1, \dots, p_Q^n), p_Q^i \geq 0, i = 1:n$

où :

– l'indice i représente l'indice du coefficient dans le jeu de coefficients p_R ou p_Q ,

– l et n sont respectivement les dimensions des matrices R et Q .

30 [0047] De plus, les matrices R et Q sont des matrices symétriques définies positives c'est-à-dire dont les valeurs propres sont positives. Pour garantir cette condition, les matrices R et Q peuvent s'écrire comme notées ci-dessous :

[0048] $R = X^T X$ et $Q = Y^T Y$, où les matrices X et Y sont des matrices diagonales.

35 Notons que lorsque les matrices R et Q sont des matrices quelconques, les matrices X et Y sont des matrices triangulaires supérieures.

[0049] A l'issue de l'étape 42, avec les hypothèses faites, le vecteur p de coefficients à déterminer est défini par la relation suivante :

(9) $p = [p_R^T p_Q^T]^T$

[0050] Lors d'une étape 44, le critère à optimiser pour déterminer le vecteur p est
40 choisi. Ici, ce critère est donné par la relation suivante :

$$(10) \quad \left\{ f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \phi(\hat{x}_k, p)\|_2^2 \right\}$$

où :

- $\|\dots\|_2$ représente l'opération norme L_2 , correspondant à la norme euclidienne,

5 – « min » représente l'opération consistant à trouver le vecteur p qui minimise la fonction $f(p)$,

– Δ est un ensemble de contraintes que doit vérifier le vecteur p qui minimise la fonction $f(p)$.

[0051] La fonction ϕ qui apparaît dans le critère (10) est la même que celle
10 introduite ci-dessus. Cette fonction ϕ permet d'obtenir l'estimation \hat{z}_k de la variable z_k à partir de l'estimation \hat{x}_k comme indiqué dans la relation suivante :

$$(11) \quad \hat{z}_k = \phi(\hat{x}_k, p)$$

[0052] On notera que la fonction ϕ dépend également du vecteur p puisque
15 l'estimation \hat{x}_k qui constitue l'argument de la fonction ϕ est elle-même fonction du vecteur p . Pour cette raison, dans la relation ci-dessus, l'estimation \hat{x}_k et le vecteur p sont indiqués comme argument de la fonction ϕ .

[0053] Lors d'une étape 46, l'ensemble Δ des contraintes à respecter par le vecteur
20 p est défini. Cet ensemble Δ comprend au moins une contrainte qui impose que l'estimation \hat{z}_k et la variable z_k soient proches l'une de l'autre. Plus précisément, cette contrainte impose ici que la trajectoire de la variable z_k soit comprise, au moins en moyenne, dans un couloir 48 d'incertitude (figure 3) situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k .

[0054] Ce couloir 48 est délimité par deux limites L_{\min} et L_{\max} situées, respectivement,
25 de chaque côté de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k . Le couloir d'incertitude représente le fait que l'estimation \hat{z}_k est uniquement connue à une incertitude près. Cette incertitude provient du fait qu'il existe une incertitude sur l'estimation \hat{x}_k utilisée pour construire l'estimation \hat{z}_k . Ainsi, pour calibrer correctement l'observateur 18, il faut que pour la majorité des instants k , la variable z_k soit comprise dans le couloir 48.

[0055] Dans le cas particulier représenté sur la figure 3, les limites L_{\max} et L_{\min} qui
30 délimitent le couloir 48 sont séparées de la trajectoire de \hat{z}_k , respectivement, par des distances a et b . Dans le cas de la figure 3, ces distances a et b sont constantes au cours du temps.

[0056] De préférence, les distances a et b sont fonctions de l'incertitude sur
35 l'estimation \hat{z}_k . Par exemple, les distances a et b sont d'autant plus grande que l'écart-type $\sigma_{\hat{z}_k}$ est grand. $\sigma_{\hat{z}_k}$ est l'écart type de l'erreur sur l'estimation \hat{z}_k . A titre d'exemple, ici, l'ensemble Δ comprend une contrainte qui impose que la moyenne des écarts entre la variable z_k et l'estimation \hat{z}_k soit inférieure à un seuil prédéterminé S_1 . Cette contrainte s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$(11) \quad \sqrt{\sum_{k=1}^N \|z_k - \hat{z}_k\|_2} \leq S_1$$

[0057] Le seuil S_1 est par exemple défini par la relation suivante :

$$(12) \quad S_1 = \sqrt{N} \alpha \sigma_{\hat{z}_k}$$

où :

- 5 – N est le nombre d'instants k , et
- α est une constante, par exemple, égale à trois.

[0058] Pour chaque vecteur p minimisant potentiellement le critère (10), il est possible de déterminer l'écart-type $\sigma_{\hat{z}_k}$. En effet, lorsqu'un vecteur p est connu, les matrices R et Q sont également connues. A partir des matrices R et Q , il est possible de calculer la matrice $P_{k|k}$ de la covariance de l'erreur d'estimation de \hat{x}_k . A partir de cette matrice $P_{k|k}$ il est possible de déterminer l'incertitude entachant l'estimation \hat{x}_k . Connaissant cette incertitude, il est possible également de déterminer l'incertitude sur l'estimation \hat{z}_k puisque la fonction ϕ reliant ces deux estimations est connue. L'incertitude sur l'estimation \hat{z}_k est alors exprimée sous la

15 forme de l'écart type $\sigma_{\hat{z}_k}$.

[0059] Lors de l'étape 46, d'autres contraintes de l'ensemble Δ peuvent être définies. Par exemple, à partir du sens physique de certains des coefficients des jeux p_R et p_Q , il est possible d'imposer des limites à ces coefficients. Par exemple, si des informations sur le bruit de mesure du capteur 10 sont connues, il est possible de

20 borner à partir de ces informations les valeurs que peuvent prendre certains coefficients du jeu p_R et p_Q .

[0060] Une fois l'ensemble Δ défini, lors d'une étape 50, le capteur 32 mesure la variable z_k à N instants différents. Le nombre N d'instants est typiquement supérieur au nombre de coefficients à déterminer contenus dans le vecteur p .

25 [0061] Une fois les variables z_k mesurées, celles-ci sont acquises par le calculateur 34. On initialise alors, lors d'une étape 52, les différentes variables et coefficients nécessaires pour minimiser le critère (10). Par exemple, la matrice initiale $P_{0/0}$ d'estimation de la covariance sur l'erreur de l'estimation \hat{x}_0 est définie par la relation suivante :

$$30 \quad (13) \quad P_{0/0} = \lambda I$$

où :

- I est la matrice identité, et
- λ est une constante.

[0062] La constante λ est réglée en fonction de la confiance que l'on a dans

35 l'initialisation de \hat{x}_0 .

[0063] Le choix d'une constante λ beaucoup plus grande que un signifie que l'incertitude sur l'estimation initiale \hat{x}_0 est très grande.

[0064] Ici, l'estimation initiale \hat{x}_0 et la valeur initiale des coefficients du vecteur p sont tirées de façon aléatoire.

[0065] Ensuite, on procède à une étape 54 de détermination du vecteur p qui minimise le critère (10). Cette étape consiste à faire varier les valeurs du vecteur p jusqu'à trouver un vecteur p qui minimise le critère (10) et qui satisfasse en même temps les contraintes de l'ensemble Δ . Cette étape est réalisée à l'aide d'un outil d'optimisation sous contraintes. De tels outils d'optimisation sous contraintes sont connus. Par exemple, un tel outil est en particulier la fonction « Fmincon » disponible dans l'environnement de développement « MATLAB® » pour le calcul numérique entre autres.

[0066] Une fois que le vecteur p qui minimise le critère (10) a été déterminé, lors de l'étape 56, les valeurs des coefficients de ce vecteur p sont utilisées pour calibrer les coefficients des matrices R et Q de l'observateur 18. Par exemple, lors de cette étape, les valeurs de ces coefficients sont copiées et enregistrées dans la mémoire 20.

[0067] Ensuite, lors d'une étape 58, le système 6 de localisation utilise les coefficients déterminés par le système 30 pour déterminer la position et l'orientation de l'objet 4 à partir des mesures réalisées par le capteur 10.

[0068] De nombreux autres modes de réalisation sont possibles. Par exemple, pour un même système physique et pour un même observateur, il est possible de faire des choix différents sur le nombre de coefficients de cet observateur à déterminer pour le calibrer. Par exemple, le nombre de coefficients peut encore être plus réduit en imposant aux différents coefficients de la matrice diagonale R ou Q d'être tous proportionnels à un même coefficient. A l'inverse, le procédé précédemment décrit s'applique également au cas où les matrices Q et R ne sont pas des matrices diagonales mais uniquement des matrices symétriques définies positives. Cette hypothèse augmente au contraire le nombre de coefficients à déterminer par le système 30.

[0069] Dans le critère (10) la norme euclidienne peut être remplacée par une autre norme.

[0070] D'autres contraintes que celles décrites précédemment peuvent être utilisées. Par exemple, il est possible d'imposer que la variable z_k soit systématiquement comprise à l'intérieur du couloir d'incertitude 48 à chaque instant k . Cette contrainte est plus forte que celle décrite en regard de la figure 3 qui impose uniquement que la variable z_k soit en moyenne comprise dans le couloir d'incertitude 48.

[0071] Des ensembles différents de contraintes peuvent être utilisés à différents instants. Par exemple, si à certains instants appartenant à un ensemble L l'incertitude sur la mesure de la variable z_k est très faible, on peut alors choisir une contrainte plus forte à ces instants. Par exemple, si l'instant k appartient à l'ensemble L , alors il est possible d'imposer que la variable z_k soit systématiquement comprise dans un

couloir d'incertitude plus restreint. Pour les instants n'appartenant pas à l'ensemble L, la contrainte utilisée sera moins forte. Par exemple elle imposera uniquement que, en moyenne, la variable z_k soit comprise dans le couloir d'incertitude 48. Le couloir d'incertitude utilisé pour définir la contrainte lorsque l'instant k appartient à l'ensemble L n'est pas nécessairement le même que celui utilisé pour définir la contrainte lorsque l'instant k n'appartient pas à cet ensemble L.

[0072] D'autres contraintes supplémentaires que celles imposant que la variable z_k soit dans le couloir d'incertitude de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k peuvent être utilisées. Par exemple, il est possible de définir des contraintes qui imposent une faible variation de l'estimation \hat{z}_k entre deux instants successifs.

[0073] D'autres choix sont possibles pour initialiser l'optimisation du critère (10) que ceux décrits ci-dessus. Par exemple, si la valeur initiale de la variable x_0 est connue, cette valeur est utilisée pour initialiser la variable x_0 et les coefficients de la matrice P_0 sont réglés en fonction de la confiance en cette valeur.

[0074] L'incertitude sur l'estimation \hat{z}_k peut être obtenue par d'autres moyens qu'à partir des observations de l'observateur. Par exemple, cette incertitude peut être déterminée expérimentalement ou à partir d'autres systèmes d'équations que ceux définissant l'observateur 18.

[0075] La variable mesurée z_k et la mesure y_k peuvent être confondues. Ainsi, il n'est pas nécessaire de recourir à un capteur supplémentaire tel que le capteur 32.

[0076] Le procédé de calibration décrit ci-dessus s'applique également au filtre de Kalman étendu (connu sous le terme anglais de « Extended Kalman Filter ») ainsi qu'au filtre de Kalman non parfumé plus connus sous l'acronyme UKF (Unscented Kalman Filter) ou à tout autre filtre récursif présentant des paramètres à régler. De manière plus générale, le procédé de calibration décrit ci-dessus peut être utilisé pour calibrer tout observateur d'une variable d'état dont des coefficients doivent être déterminés au préalable. Ainsi, les coefficients susceptibles d'être déterminés à l'aide du procédé ci-dessus ne sont pas limités à ceux d'une matrice de covariance.

[0077] L'invention a été décrite dans le cadre d'une application donnée. Cependant, elle n'est pas limitée à ce type d'application. D'autres applications peuvent être prises en compte, comme, par exemple, obtenir des mesures dans le sondage des fonds des mers, pour lequel le système physique permet d'avoir des mesures représentatives des distances surfaces/fonds des mers ou aux profondeurs des mers.

REVENDECATIONS

1. Procédé de calibration des coefficients d'un observateur d'une variable d'état x_k d'un système physique à partir de mesures de grandeurs physiques de ce système, où l'indice k identifie l'instant de mesure, caractérisé en ce que le procédé comporte :
- la mesure (50) d'une variable z_k du système physique à N instants différents, cette variable z_k étant fonction de la variable d'état x_k ,
 - la détermination (54) d'un vecteur p de coefficients qui minimise le critère suivant en respectant un ensemble prédéterminé Δ de contraintes :

$$\left\{ f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \phi(\hat{x}_k, p)\|^2 \right\}$$

où :

- \hat{x}_k est l'estimation de la variable x_k construite par l'observateur calibré avec les coefficients du vecteur p à l'instant k,
- ϕ est une fonction connue qui relie l'estimation \hat{x}_k à une estimation \hat{z}_k de la variable z_k ,
- $\|\dots\|^2$ est une norme de la différence entre z_k et $\phi(\hat{x}_k, p)$, et
- la ou les contraintes de l'ensemble Δ imposent que la trajectoire de la variable z_k soit comprise dans un couloir d'incertitude situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k au moins pour la majorité des instants k .

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'ensemble Δ comprend une contrainte qui impose que la variable z_k soit comprise entre $\hat{z}_k - a$ et $\hat{z}_k + b$, où a et b sont des constantes positives prédéterminées.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel les constantes a et b sont proportionnelles à un écart-type $\sigma_{\hat{z}_k}$ représentatif de l'incertitude sur l'estimation \hat{z}_k .

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'ensemble Δ de contraintes comprend une contrainte qui impose que la moyenne des écarts entre la variable z_k et son estimation \hat{z}_k soit inférieure à un seuil prédéterminé S_1 .

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel le seuil S_1 est fonction de l'incertitude sur l'estimation de \hat{z}_k .

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'observateur est un filtre de Kalman, un filtre de Kalman étendu ou un filtre de Kalman non parfumé et les coefficients à calibrer sont les coefficients des matrices de covariances R et Q de ce filtre.

5

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel les matrices R et Q sont choisies diagonales.

8. Support (36) d'enregistrement d'informations, caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour l'exécution d'un procédé conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, lorsque ces instructions sont exécutées par un ordinateur électronique.

9. Système de calibration des coefficients d'un observateur d'une variable d'état x_k d'un système physique à partir de mesures de grandeurs physiques de ce système, où l'indice k identifie l'instant de mesure, caractérisé en ce que ce système comporte :

- au moins un capteur (32) apte à mesurer une variable z_k du système physique à N instants différents, cette variable z_k étant fonction de la variable d'état x_k , et
- un ordinateur (34) apte à déterminer un vecteur p de coefficients qui minimise le critère suivant en respectant un ensemble prédéterminé Δ de contraintes :

$$\left\{ f(p) = \sum_{k=1}^N \|z_k - \phi(\hat{x}_k, p)\|^2 \right\}$$

où :

- \hat{x}_k est l'estimation de la variable x_k construite par l'observateur calibré avec les coefficients du vecteur p à l'instant k ,
- ϕ est une fonction connue qui relie l'estimation \hat{x}_k à une estimation \hat{z}_k de la variable z_k ,
- $\|\dots\|^2$ est une norme de la différence entre z_k et $\phi(\hat{x}_k, p)$, et
- la ou les contraintes de l'ensemble Δ impose que la trajectoire de la variable z_k soit comprise dans un couloir d'incertitude situé de part et d'autre de la trajectoire de l'estimation \hat{z}_k au moins pour la majorité des instants k .

25

30

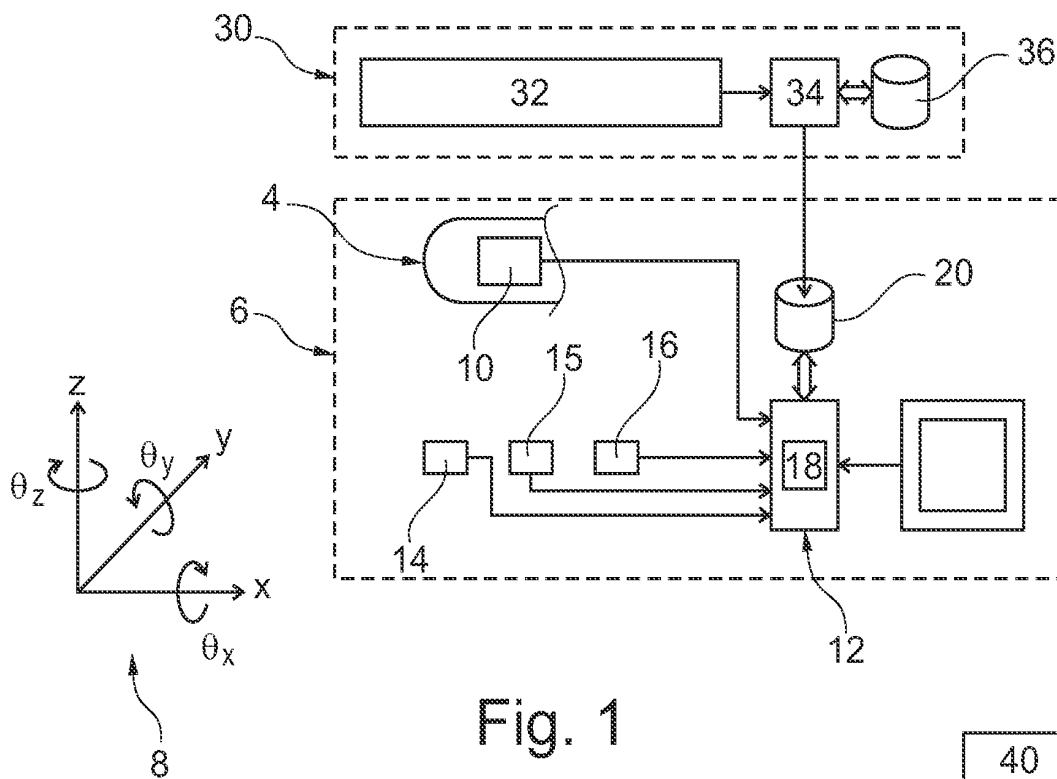


Fig. 1

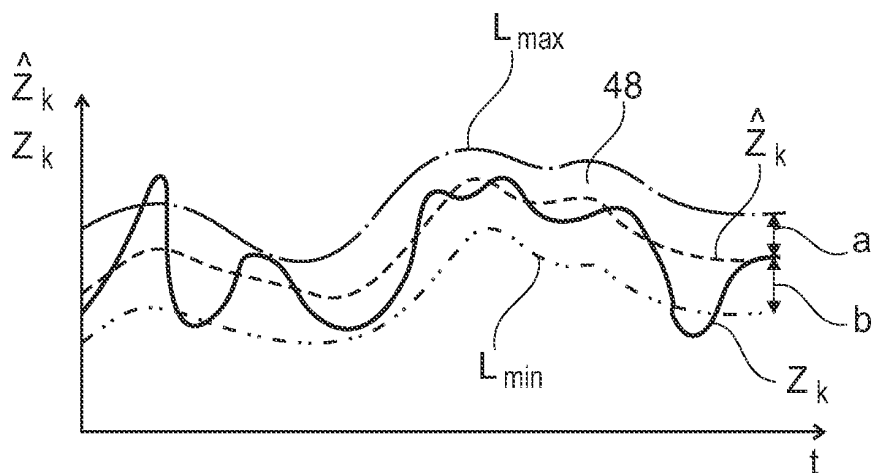


Fig. 3

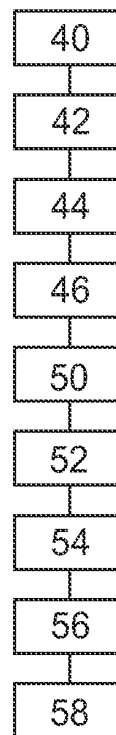


Fig. 2



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 738066
FR 1052261

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	BERNT M. AKESSON ET AL.: "A Tool for Kalman Filter Tuning", COMPUTER AIDED CHEMICAL ENGINEERING, 21 février 2008 (2008-02-21), pages 859-864, XP002616486, Amsterdam, The Netherlands DOI: 10.1016/S1570-7946(07)80166-0 * le document en entier *	1,9	H03H17/02 A61B5/06
A	YUAN GAO ET AL: "Self-Tuning Multisensor Weighted Measurement Fusion Kalman Filter", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 45, no. 1, 1 janvier 2009 (2009-01-01), pages 179-191, XP011268019, ISSN: 0018-9251, DOI: 10.1109/TAES.2009.4805272 * alinéas [000I], [III] - [00IV] *	1,9	
A	XIAOHE LI ET AL: "Object tracking using an adaptive Kalman filter combined with mean shift", OPTICAL ENGINEERING SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING USA, vol. 49, no. 2, février 2010 (2010-02), pages 020503-1-020503-3, XP002616487, ISSN: 0091-3286, DOI: 10.1117/1.3327281 * alinéa [0003] *	1,9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) A61B
A	US 2003/115232 A1 (LIPP JOHN [US] LIPP JOHN I [US]) 19 juin 2003 (2003-06-19) * alinéas [0036] - [0095] *	1,9	
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		13 janvier 2011	De La Pinta, Luis
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

4
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**
établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 738066
FR 1052261

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A,D	CA 2 266 282 A1 (NNEME NNEME LEANDRE [CA]; O'SHEA JULES [CA]) 19 septembre 2000 (2000-09-19) * abrégé * -----	1,9	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		13 janvier 2011	De La Pinta, Luis
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		
		& : membre de la même famille, document correspondant	

4

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1052261 FA 738066**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **13-01-2011**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2003115232 A1	19-06-2003	AUCUN	

CA 2266282 A1	19-09-2000	AUCUN	
