

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 23.03.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 27.09.24 Bulletin 24/39.

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 :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES
Société par actions simplifiée (SAS) — FR.

72 Inventeur(s) : KUCHLY Jean et BENATTIA Seif
Eddine.

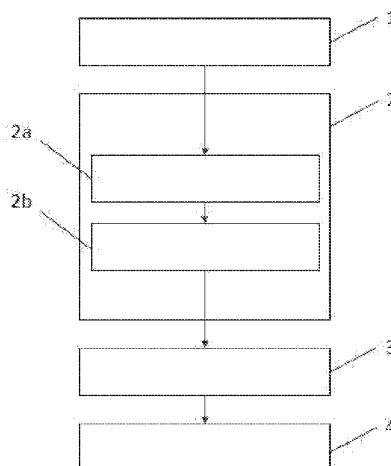
73 Titulaire(s) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES Société
par actions simplifiée (SAS).

74 Mandataire(s) : Casalonga.

54 Procédé de calibration d'un estimateur par filtre de Kalman pour la commande d'un dispositif de détection
et d'isolement de défaut sur une voie de mesure d'un capteur redondé.

57 L'invention se rapporte à un procédé de calibration
d'un estimateur par filtre de Kalman d'un système de com-
mande d'un dispositif comprenant au moins un capteur re-
dondé, le procédé comprenant les étapes suivantes :
a. identification d'un ensemble de commandes de ré-
férence du dispositif réalisé dans une durée prédéterminée,
d. détermination d'une fonction de coût fonction d'un
jeu de constantes de temps du filtre de Kalman,
e. optimisation de la fonction de coût par rapport au jeu
de constantes de temps,
f. détermination du jeu de constantes de temps cali-
brant le filtre de Kalman en fonction de la racine de l'erreur
quadratique moyenne entre mesure et valeur estimée et en
fonction de la somme des constantes de temps.

Figure pour l'abrégé : Fig 1



Description

Titre de l'invention : Procédé de calibration d'un estimateur par filtre de Kalman pour la commande d'un dispositif de détection et d'isolement de défaut sur une voie de mesure d'un capteur redondé

Domaine technique

[0001] L'invention a pour domaine technique les systèmes de commande, notamment intégrés aux aéronefs, et plus précisément les systèmes de commande à estimateur par filtre de Kalman comprenant un capteur redondé.

Techniques antérieures

[0002] Les capteurs LVDT (acronyme pour « Linear Variable Differential Transformer ») sont des capteurs de mesure d'un déplacement linéaire basés sur le principe de fonctionnement d'un transformateur électrique. Dans le domaine aéronautique, de tels capteurs sont employés pour déterminer la position linéaire d'actionneurs, tels que des vérins, notamment pour le dosage de carburant ou le contrôle de la géométrie variable des aubes d'un compresseur.

[0003] De tels capteurs LVDT sont employés dans des boucles de contrôle s'effectuant en deux parties :

[0004] - une première partie, globale, calculant des consignes d'un actionneur impliquant un vérin muni d'un capteur LVDT en fonction d'un modèle,

[0005] - une deuxième partie, locale, réalisant les consignes d'actionneur en fonction d'une courbe de réponse de l'actionneur.

[0006] L'application au domaine aéronautique implique généralement la redondance des commandes, ou tout du moins des capteurs de mesure. Ainsi, chaque capteur LVDT est généralement redondé pour offrir une résistance aux erreurs et dérives de l'actionneur. Le capteur LVDT redondé comprend alors deux voies de mesure, l'une dite locale, l'autre dite cross.

[0007] Néanmoins, chaque capteur LVDT redondé peut lui aussi souffrir d'erreurs et de dérives. Dans de tels cas, il apparaît un écart de mesure de position entre les deux voies redondées d'un même capteur. Si cet écart dépasse un seuil prédéfini, dit seuil de cross-check, l'écart doit être pris en compte.

[0008] Lors d'une telle panne de « cross-check », on peut alors être amené à sélectionner l'une des deux voies de mesure du capteur redondé, ou une moyenne des deux voies de mesure. Pour assurer la précision et la fiabilité de la mesure fournie par le capteur, il est nécessaire d'assurer une bonne localisation d'une voie de mesure erronée ou en panne.

[0009] De l'état de la technique antérieure, on connaît les documents US20200201312,

CN110118128 et US2009043447 qui décrivent chacun la détection de la défaillance d'un capteur mesurant une grandeur par rapport à d'autres capteurs mesurant des grandeurs différentes, notamment au travers d'une architecture particulière de filtres de Kalman. Ces documents décrivent l'utilisation de « banques » (i.e. plusieurs filtres de Kalman différents) utilisées avec les mêmes capteurs. L'interprétation des résidus (i.e. écarts entre les sorties du modèle et les mesures capteur) permet de détecter le capteur défaillant, mais ne permet pas toujours de localiser une voie de mesure défaillante.

[0010] En vue de la détermination d'une voie défaillante d'un capteur LVDT redondé par application d'un filtre de Kalman unique, il est nécessaire de disposer d'une calibration optimale dudit estimateur à filtre de Kalman, permettant de disposer d'une capacité de choix de la voie de mesure saine plus rapide et fiable qu'en cas de calibration arbitraire de l'estimateur.

Exposé de l'invention

[0011] L'invention a pour objet un procédé de calibration d'un estimateur par filtre de Kalman compris dans un système de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, le système de commande comprenant au moins un capteur redondé configuré de sorte à déterminer une grandeur du au moins un équipement, le capteur redondé comprenant deux voies de mesure redondantes, le procédé de calibration comprenant les étapes suivantes :

[0012] a. identification d'un ensemble de commandes de référence du dispositif,

[0013] b. détermination d'une fonction de coût fonction d'un jeu de constantes de temps définissant par ailleurs le filtre de Kalman, d'un seuil d'écart de grandeur mesurée entre les deux voies d'un même capteur redondé au-delà duquel on considère qu'un défaut est présent, d'un paramètre de compromis définissant la priorité donnée à la vitesse de convergence ou à la précision de l'estimateur, et de l'écart pour chaque équipement entre grandeur mesurée et grandeur estimée par l'estimateur par filtre de Kalman, l'écart étant calculé pour au moins deux instants compris dans la durée de l'ensemble de commandes de référence,

[0014] c. optimisation par minimisation de la valeur de la fonction de coût en faisant varier le jeu de constantes de temps pour une valeur de paramètre de compromis donnée,

[0015] d. répétition de l'optimisation par minimisation pour au moins une autre valeur de paramètre de compromis, et

[0016] e. détermination du jeu de constantes de temps associé à une valeur de paramètre de compromis dont la racine de l'erreur quadratique moyenne entre la valeur mesurée et la valeur estimée de position des équipements et la somme des constantes de temps sont inférieures chacune à un seuil, ledit jeu de constantes de temps calibrant l'estimateur par filtre de Kalman.

- [0017] Pour déterminer la valeur prise par la fonction de coût pour un jeu de constantes de temps, on peut réaliser les sous-étapes suivantes :
- [0018] a. détermination du gain du filtre de Kalman pour le jeu de constantes de temps et pour chaque point de fonctionnement autour duquel le dispositif a été linéarisé,
- [0019] b. détermination de la valeur estimée de la mesure du capteur redondé associé à chaque équipement du dispositif par l'intermédiaire de l'estimateur à filtre de Kalman dans tout l'ensemble de commandes de référence identifié et pour les au moins deux instants compris dans la durée de l'ensemble de commandes de référence.
- [0020] Pour réaliser l'optimisation par minimisation de la valeur de la fonction de cout, on peut utiliser un algorithme génétique.
- [0021] Un autre objet de l'invention est un procédé de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, ledit dispositif étant muni par ailleurs d'au moins un capteur apte à mesurer chacun une grandeur de fonctionnement du dispositif, et un capteur redondé pour chaque équipement de sorte à disposer de deux voies de mesure pour chaque grandeur physique mesurée, le procédé de commande comprenant les étapes suivantes :
- a. on calibre un estimateur à filtre de Kalman par le procédé de calibration tel que décrit ci-dessus,
 - b. on détermine une mesure sélectionnée pour le au moins un équipement commandé, par l'estimateur à filtre de Kalman calibré, en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du dispositif et des mesures des voies de mesure du capteur redondé pour l'équipement commandé, puis
 - c. on détermine une commande à destination du au moins un équipement en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du dispositif et de la mesure sélectionnée pour l'équipement commandé, et
 - d. on détecte une panne d'une des voies de mesure du capteur redondé de sorte à en exclure la voie de mesure.
- [0022] L'invention a également pour objet un système de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, le système de commande comprenant au moins un capteur apte à mesurer chacun une grandeur de fonctionnement du dispositif, et un capteur redondé pour chaque équipement, au moins un moyen de commande imbriquée configuré pour déterminer une commande à destination du au moins un équipement en fonction de la mesure d'au moins une grandeur de fonctionnement du dispositif et d'une mesure sélectionnée pour l'équipement commandé, le système de commande comprenant en outre un moyen de calcul configuré pour déterminer la mesure sélectionnée pour le au moins un équipement commandé, par un estimateur par filtre de Kalman, en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du

dispositif et des mesures des voies de mesure du capteur redondé pour l'équipement commandé, le moyen de calcul étant en outre configuré pour détecter une panne d'une des voies de mesure du capteur redondé de sorte à en exclure la voie de mesure, dans lequel l'estimateur à filtre de Kalman est calibré par le procédé de calibration tel que décrit ci-dessus.

- [0023] Le dispositif peut être un moteur d'aéronef et les voies de mesure du capteur redondé peuvent mesurer la position des vérins de géométrie variable, la position de la valve de dosage carburant, les calages variables des stators du compresseur haute pression du moteur, la mesure de la température en entrée du compresseur haute pression du moteur, ou la mesure de pression statique en entrée de la chambre de combustion du moteur.
- [0024] L'équipement peut être un actionneur du moteur d'aéronef, par exemple un vérin.
- [0025] Le capteur redondé peut être un capteur LVDT.
- [0026] L'invention a également pour objet un aéronef muni d'un système de commande tel que décrit ci-dessus.

Brève description des dessins

- [0027] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :
- [0028] - la figure [Fig.1] illustre les principales étapes d'un procédé de calibration selon un exemple de réalisation de l'invention.

Description détaillée

- [0029] Un dispositif peut être modélisé par une représentation d'état, basée sur un vecteur des états du dispositif, noté x , un vecteur des commandes appliquées au dispositif, noté u et un vecteur des mesures du dispositif, noté y .
- [0030] Dans un cas idéal, la modélisation du dispositif est linéaire et la représentation d'état peut alors s'écrire :
- [0031] [Math.1]

$$\begin{cases} x_{k+1} = A x_k + B u_k \\ y_k = C x_k + D u_k \end{cases}$$
- [0032] Avec :
- [0033] A,B,C,D : des matrices de réglage, précisant la contribution de chaque valeur des vecteurs x et u sur les valeurs du vecteur x à l'itération suivante et sur les valeurs du vecteur y .
- [0034] Dans la réalité, la modélisation d'un dispositif est souvent non linéaire. On note alors la représentation d'état du dispositif de la façon suivante :

[0035] [Math.2]

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) \\ y_k = h(x_k, u_k) \end{cases}$$

[0036] La résolution du système d'équations compris dans la modélisation d'un dispositif peut alors être longue et complexe selon la nature des fonctions f et h .

[0037] Un dispositif (par exemple, un moteur), ou un équipement qu'il comprend (par exemple, un actionneur), fonctionne généralement sur une plage réduite de valeurs, également appelée régime de fonctionnement. On cherche alors à linéariser les fonctions f et h par développement limité autour d'un point de fonctionnement défini $\{x_0, u_0\}$ compris dans le régime de fonctionnement. En considérant que $f(x_0, u_0) = x_0$ et $h(x_0, u_0) = y_0$ du fait du fonctionnement en régime stabilisé, et en considérant que

$$A = \frac{\partial f(x,u)}{\partial x}, B = \frac{\partial f(x,u)}{\partial u}, C = \frac{\partial h(x,u)}{\partial x}, \text{ et } D = \frac{\partial h(x,u)}{\partial u}, \text{ on obtient le système d'équations}$$

[Math 3] ci-dessous après avoir réalisé le développement limité des fonctions f et h du système d'équations [Math 2].

[0038] S'il est nécessaire de disposer d'une modélisation sur une gamme élargie de valeurs, pour accommoder par exemple un régime de fonctionnement plus large, il convient alors de réaliser d'autres linéarisations autour d'autres points de fonctionnement couvrant la gamme élargie de valeurs.

[0039] Pour le point de fonctionnement $\{x_0, u_0\}$, les valeurs des états, des commandes et des sorties sont constantes et ont respectivement pour valeur x_0, u_0, y_0 . La modélisation du dispositif peut alors être représentée de la façon suivante :

[0040] [Math.3]

$$\begin{cases} x_{k+1} - x_0 = A(x_k - x_0) + B(u_k - u_0) \\ y_k - y_0 = C(x_k - x_0) + D(u_k - u_0) \end{cases}$$

[0041] Connaissant cette représentation du dispositif autour du point de fonctionnement $\{x_0, u_0\}$, on cherche maintenant à en réaliser une estimation.

[0042] Un estimateur, dans le cadre de la représentation d'état, est un algorithme permettant d'estimer un état pour une des raisons suivantes :

[0043] - l'état est mesuré avec une forte incertitude,

[0044] - l'état n'est pas mesuré, et on ne souhaite pas ajouter de capteur au dispositif, ou

[0045] - l'état correspond à une grandeur intrinsèque qu'il est impossible de mesurer directement (par exemple, rendement, section, coefficient de convection...).

[0046] L'estimateur de la mesure d'un capteur redondé LVDT d'un équipement i du dispositif va maintenant être décrit.

- [0047] On pose l'écart ε d'une grandeur mesurée par le capteur LVDT de l'équipement i égal à la différence entre la valeur mesurée $LVDT_{i\ mes}$ de cette grandeur et la valeur réelle $LVDT_{i\ reel}$ de cette grandeur.
- [0048] [Math.4]

$$\varepsilon = LVDT_{i\ reel} - LVDT_{i\ mes}$$
- [0049] On cherche à réduire cet écart ε par calcul itératif.
- [0050] On note g_i la fonction qui relie la position réelle de l'équipement i et la grandeur x que l'on souhaite commander par l'intermédiaire de l'équipement i .
- [0051] [Math.5]

$$x_i = g_i(LVDT_{i\ reel})$$
- [0052] La fonction g_i est bijective de sorte que $LVDT_{i\ reel} = g_i^{-1}(x_i)$
- [0053] On introduit ensuite θ qui représente l'écart entre la valeur de la commande effectivement appliquée au système et la valeur de la commande correspondant à la mesure LVDT. On obtient alors un système d'équations de la forme suivante.
- [0054] [Math.6]

$$\theta = g(LVDT_{i\ reel}) - g(LVDT_{i\ mes})$$
- [0055] On obtient ainsi un nouvel ensemble de vecteurs, comprenant le vecteur d'état x , le vecteur de commande u et le vecteur de mesures y entre lesquels sont réparties les grandeurs x , les mesures LVDT i et les commandes θ .
- [0056] On utilise la représentation d'état pour prédire les mesures y_k que l'on devrait obtenir. On mesure les grandeurs y par les capteurs redondés LVDT. On détermine un écart ε pour chaque grandeur en fonction de la valeur prédite et de la mesure correspondante du capteur redondé LVDT puis on estime chaque commande θ en fonction des mesures y_k et des grandeurs y et de l'écart ε .
- [0057] On réalise ces étapes deux fois en parallèle, une fois pour les données de la voie locale de chaque capteur redondé LVDT et une fois pour les données de la voie cross de chaque capteur redondé LVDT. On rappelle qu'un capteur redondé LVDT comprend deux voies de mesure redondantes, dites voie locale et voie cross, portant normalement des valeurs proches.
- [0058] On peut déterminer un écart entre les valeurs de la voie locale et de la voie cross d'un même capteur redondé LVDT et comparer cet écart à un seuil dit de cross-check. Si l'écart est supérieur au seuil de cross-check, un défaut est présent et une des deux voies doit être choisie comme voie saine. Cela est réalisé en considérant la voie saine comme celle ayant la valeur présentant l'écart le plus faible par rapport à l'estimation de la grandeur mesurée $LVDT_{i\ mes}$.
- [0059] Pour pouvoir les estimer, on ajoute au vecteur des états x les valeurs θ des écarts entre commande déduite de la mesure de position LVDT et commande effectivement

appliquée au dispositif. On appelle ces valeurs θ des perturbations dans la suite de ce document.

[0060] L'ajout de ces perturbations dans le vecteur des états x permet de reformuler la représentation d'état de l'équation [Math 3]. La représentation d'état tenant compte des perturbations est alors la suivante.

[0061] [Math.7]

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}_{k+1} - \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}_k - \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (u_k - u_0) \\ y_k = [C \ D] \begin{pmatrix} x \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}_k - \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + D(u_k - u_0) \end{cases}$$

[0062] Avec :

[0063]
$$A_p = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

[0064]
$$B_p = \begin{bmatrix} B \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

[0065]
$$C_p = [C \ D],$$

[0066]
$$D_p = [C \ D].$$

[0067] Un estimateur d'état d'un système dynamique est défini par l'équation fondamentale suivante :

[0068] [Math.8]

$$\hat{x}_{k+1} - x_0 = A(\hat{x}_k - x_0) + B(u_k - u_0) + K(C(\hat{x}_k - x_0) + D(u_k - u_0) - (z_k - y_0))$$

[0069] Avec :

[0070] $\hat{x}_k$: la valeur estimée de l'état,

[0071] z_k : les mesures des grandeurs y_k obtenues par les capteurs à l'instant k

[0072] La valeur de l'état est mise à jour avec l'équation de la dynamique du modèle ($A(\hat{x}_k - x_0) + B(u_k - u_0)$), corrigée par l'écart entre les valeurs prédites des grandeurs mesurées ($C(\hat{x}_k - x_0) + D(u_k - u_0) - (z_k - y_0)$) et les valeurs effectivement mesurées ($z_k - y_0$).

[0073] Dans l'équation [Math 8], la matrice K , appelée gain de l'estimateur, permet de

pondérer le terme correctif. En d'autres termes, la matrice K permet de pondérer le compromis entre modèle et mesures.

[0074] Lorsque les valeurs de la matrice K sont faibles, la valeur estimée $\hat{x}_{k+1} - x_0$ dépendra essentiellement du terme $A(\hat{x}_k - x_0) + B(u_k - u_0)$ et peu du terme $C(\hat{x}_k - x_0) + D(u_k - u_0) - (z_k - y_0)$. En d'autres termes, la valeur estimée dépend plus du modèle que de la mesure. L'estimation converge alors lentement mais est plus robuste envers les erreurs de mesure.

[0075] A l'inverse, lorsque les valeurs de la matrice K sont fortes, la valeur estimée $\hat{x}_{k+1} - x_0$ dépend essentiellement du terme $C(\hat{x}_k - x_0) + D(u_k - u_0) - (z_k - y_0)$ et peu du terme $A(\hat{x}_k - x_0) + B(u_k - u_0)$. La valeur estimée dépend alors plus de la mesure que du modèle. L'estimation converge rapidement mais est plus sensible aux erreurs de mesure.

[0076] On appelle synthèse de l'estimateur, l'opération de détermination de la matrice K . Parmi les différentes méthodes de synthèse d'estimateur, on préférera la résolution de l'équation algébrique de Riccati, permettant d'aboutir à un filtre de Kalman. Ces perturbations sont généralement liées aux perturbations internes du modèle de perturbation, à la fréquence d'échantillonnage T de l'estimation, et aux constantes de temps τ_i du moyen de calcul mettant en œuvre l'estimateur.

[0077] [Math.9]

$$\begin{cases} x\theta_{k+1} = A_\theta \cdot x\theta_k + B_\theta \cdot \sigma_k \\ \theta_k = C_\theta \cdot x\theta_k + D_\theta \cdot \sigma_k \end{cases}$$

[0078] Avec :

[0079] $A_\theta = Id$

[0080] $B_\theta = TeId$

[0081] $C_\theta = Id$

[0082]
$$D_\theta = \begin{bmatrix} \tau_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \tau_n \end{bmatrix}$$

[0083] Id = matrice identité

[0084] Les valeurs $x\theta_i$ avec $i = k$ ou $k+1$ correspondent à la valeur des perturbations internes au modèle de perturbation. Les valeurs θ_i sont utilisées pour alimenter le modèle. La valeur Te correspond à la fréquence d'échantillonnage de l'estimation. Les valeurs τ_i sont des constantes de temps, calibrées par l'implémentateur, et qui correspondent à la dynamique que l'on souhaite affecter à l'estimation de la perturbation sur l'équipement correspondant. Les valeurs σ_i sont des entrées virtuelles, affectées à chaque équipement.

[0085] On réalise alors la mise en série du modèle de perturbation [Math 7] avec le modèle du dispositif [Math 3]. En d'autres termes, on détermine les perturbations θ_i en fonction des valeurs σ_i d'entrées virtuelles par le modèle de perturbation puis on injecte ces perturbations θ_i dans le modèle linéarisé en tant que vecteur de commandes u .

[0086] On obtient alors un nouveau système d'équations présentant une forme similaire au modèle précédent du dispositif, mais dépendant des entrées virtuelles des équipements σ_i et représenté par le système d'équations suivant.

[0087] [Math.10]

$$\begin{cases} x_{k+1} - x_0 = A \cdot (x_k - x_0) + B (C_\theta \cdot x\theta_k + D_\theta \cdot \sigma_k - u_0) \\ x\theta_{k+1} = A_\theta \cdot x\theta_k + B_\theta \cdot \sigma_k \\ y_k - y_0 = C \cdot (x_k - x_0) + D \cdot (C_\theta \cdot x\theta_k + D_\theta \cdot \sigma_k - u_0) \end{cases}$$

[0088] On note que le dispositif est toujours modélisé autour du point de fonctionnement $\{x_0, u_0\}$.

[0089] Le système d'équations [Math 10] peut alors être réexprimé en simplifiant les matrices identités, et de sorte à supprimer la deuxième équation. On obtient alors l'équation suivante.

[0090] [Math.11]

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x \\ x\theta \end{pmatrix}_{k+1} - \begin{pmatrix} x_0 \\ u_0 \end{pmatrix}_k = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{pmatrix} x \\ x\theta \end{pmatrix}_k - \begin{pmatrix} x_0 \\ u_0 \end{pmatrix} \right) + \begin{bmatrix} B \cdot D_\theta \\ B_\theta \end{bmatrix} \sigma_k \\ y_k - y_0 = [C \ D] \cdot \left(\begin{pmatrix} x \\ x\theta \end{pmatrix}_k - \begin{pmatrix} x_0 \\ u_0 \end{pmatrix} \right) + D \cdot D_\theta \cdot \sigma_k \end{cases}$$

[0091] L'équation algébrique de Riccati, dans un contexte discret, s'écrit ainsi :

[0092] [Math.12]

$$A_p^T P A_p - P - (A_p^T P C_p + T) (C_p^T P C_p + V)^{-1} (C_p^T P A_p + T^T) + W = 0$$

[0093] Où :

[0094]
$$A_p = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix},$$

[0095]
$$C_p = [C \ D],$$

[0096] P : la covariance de l'erreur d'estimation en régime permanent.

[0097] V : la covariance du bruit de mesure avec lui-même,

[0098] W : la covariance du bruit de modèle avec lui-même,

[0099] T : la covariance du bruit de mesure avec le bruit de modèle.

[0100] On rappelle que la matrice P est l'inconnue de l'équation, dont on recherche la valeur. Considérant les matrices $\begin{bmatrix} B \cdot D_\theta \\ B_\theta \end{bmatrix}$ et $(D \cdot D_\theta)$ de l'équation [Math 11], on

définit les matrices V , W et T suivantes :

[0101] [Math.13]

$$\begin{cases} V = D \cdot D_\theta (D \cdot D_\theta)^T \\ W = \begin{bmatrix} B \cdot D_\theta \\ B_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \cdot D_\theta \\ B_\theta \end{bmatrix}^T \\ T = \begin{bmatrix} B \cdot D_\theta \\ B_\theta \end{bmatrix} (D \cdot D_\theta)^T \end{cases}$$

[0102] Après résolution du système d'équations [Math 12], [Math 13], on obtient la matrice P . Connaissant la matrice P , on peut alors déterminer la matrice K :

[0103] [Math.14]

$$K = P \cdot C_p^T \cdot V^{-1}$$

[0104] On peut alors mettre en œuvre le Filtre de Kalman défini par l'équation [Math 8]. Le compromis entre rapidité de convergence de l'estimation et robustesse aux erreurs de mesure peut être réglé à l'aide des paramètres calibrables à disposition, c'est-à-dire les constantes de temps τ_i de la matrice D_θ .

[0105] Si les constantes de temps τ_i ont des valeurs élevées, la convergence de l'estimation sera plus longue, ce qui permettra de filtrer le bruit de mesure mais également des erreurs de modèle de fréquence élevée.

[0106] Si les constantes de temps τ_i ont des valeurs faibles, l'estimation convergera très rapidement mais sera vulnérable à la fois au bruit de mesure et aux erreurs de modèle de fréquence élevée.

[0107] Dès lors que le filtre de Kalman est déterminé, il reste à le calibrer en déterminant les constantes de temps τ_i associées.

[0108] Il est à noter que la linéarisation d'un système non-linéaire telle que décrite plus haut est une technique largement répandue et présentant de nombreux avantages. Elle souffre néanmoins d'un défaut majeur en ce que le dispositif ne se comporte de manière linéaire qu'autour du point de fonctionnement $\{x_0, u_0\}$ autour duquel la linéarisation a été réalisée. Cette hypothèse ne représente pas de problème majeur pour l'état x_0 , et pour les états x avoisinants. Ces grandeurs dynamiques varient continûment avec une certaine inertie, ce qui implique que les écarts $x_k - x_0$ sont par nature faibles.

[0109] Il n'en est pas de même pour la commande, qui peut varier brusquement lors du fonctionnement transitoire du dispositif. Dans de tels régimes transitoires, il est commun

d'observer l'apparition d'erreurs de modélisation de fréquence élevée, susceptibles d'altérer profondément la qualité de l'estimation si le filtre de Kalman, et donc ses constantes de temps, ne sont pas calibrés de manière appropriée.

[0110] Le procédé de calibration suivant permet d'obtenir une commande de l'équipement robuste à de tels régimes transitoires. La figure [Fig.1] illustre les principales étapes du procédé de calibration selon un exemple de réalisation.

[0111] Au cours d'une première étape 1, on identifie un ensemble de commandes de référence du dispositif donnant lieu à un fonctionnement transitoire. L'ensemble de commandes de référence comprend au moins deux commandes à destination du dispositif réalisées dans une durée prédéterminée, entre un temps initial $t=0$ et un temps final t_f . En d'autres termes, on identifie une manœuvre de référence du dispositif ou un scénario d'utilisation dudit dispositif générant un régime de fonctionnement transitoire d'au moins une grandeur physique d'un équipement compris dans ledit dispositif, mesurée par un capteur LVDT.

[0112] Au cours d'une deuxième étape 2, on définit une fonction de coût fonction d'un jeu donné de constantes de temps τ_i . Le jeu donné de constantes de temps τ_i comprises dans la matrice D_θ décrite plus haut en liaison avec le système d'équations [Math 9] permet de définir l'estimateur de Kalman au travers du gain K. La fonction de coût J est exprimée par l'équation suivante.

[0113] [Math.15]

$$J(\{\tau_i\}_{i \in GV}) = \alpha \sum_{i \in GV} \tau_i + (1 - \alpha) \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i \in GV} \frac{1}{Seuil_{LVDT_i}} \sqrt{(LVDT_{i_{reel}}(t) - LVDT_{i_{est}}(t))^2}$$

[0114] Où :

[0115] GV : l'ensemble des équipements considérés compris dans le dispositif modélisé

[0116] τ_i : constante de temps associée à l'équipement i compris dans l'ensemble GV des équipements

[0117] $Seuil_{LVDT_i}$: le seuil de cross-check pour le capteur LVDT de l'équipement i

[0118] $LVDT_{i_{reel}}$: la position réelle du vérin de l'équipement i mesurée par le capteur LVDT de l'équipement i ,

[0119] $LVDT_{i_{est}}$: la position estimée du vérin de l'équipement i estimée par le filtre de Kalman ,

[0120] $\alpha \in [0; 1]$: la pondération entre la rapidité de convergence de l'estimateur et la robustesse de l'estimation, également appelé paramètre de compromis

[0121] t_f : durée de l'ensemble de commandes de référence

[0122] Le seuil de cross-check $Seuil_{LVDT_i}$ est le seuil d'écart de mesure de position entre les deux voies de mesure redondantes d'un capteur redondé au-delà duquel on considère qu'un défaut est présent. Comme cette valeur de seuil de cross-check est différente pour chaque équipement, elle permet de normaliser les contributions

relatives des erreurs d'estimation sur chaque équipement.

[0123] Pour un jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps, on réalise les sous-étapes suivantes :

[0124] Au cours d'une première sous-étape 2a, on détermine le gain K du filtre de Kalman pour le jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps et pour chaque point de fonctionnement $\{x_0, u_0\}$ autour duquel la modélisation du dispositif a été linéarisée, par application de l'équation [Math 14].

[0125] Au cours d'une deuxième sous-étape 2b, on détermine la valeur estimée $LVD T_{i\ est}$ de la mesure du chaque capteur redondé mesurant une grandeur d'un équipement i par application du filtre de Kalman ([Math 8]) dans tout l'ensemble de commandes de référence identifié à la première étape et en fonction du gain K déterminé à la première sous-étape.

[0126] Lors de cette deuxième sous-étape 2b, on fixe à zéro la valeur des perturbations réelles sur les voies locales et cross des mesures de position du capteur redondé de chaque équipement i . Comme on ne simule pas de bruit de mesure, toute estimation de perturbation par le filtre de Kalman est l'image d'une erreur de modélisation. On précise que l'estimation de perturbation, dite valeur RMSE (acronyme anglophone pour « root mean square error » ou « racine de l'erreur quadratique moyenne » en Français), est ici égale à :

[0127] [Math.16]

$$RMSE = \sum_{t=0}^{tf} \sum_{i \in GV} \frac{1}{Seuil_{LVD T_i}} \sqrt{(LVD T_{i\ reel}(t) - LVD T_{i\ est}(t))^2}$$

[0128] Pour être le plus robuste possible, on souhaite donc que la valeur estimée de toutes les perturbations, ou valeur RMSE, soit la plus proche possible de zéro tout au long de la simulation.

[0129] Au cours d'une troisième étape 3, on détermine la valeur du coût J pour une valeur donnée du paramètre α et pour le jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps.

[0130] Pour une valeur donnée du paramètre α , c'est-à-dire pour un compromis donné entre rapidité et robustesse de l'estimateur, les performances d'estimation optimales sont permises par le jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps qui minimise la fonction coût J [Math 15]. On cherche donc à résoudre le problème d'optimisation numérique suivant :

[0131] [Math.17]

$$\min_{\{\tau_i\}_{i \in GV}} J(\{\tau_i\}_{i \in GV}) \text{ sous les contraintes : } \{\tau_i\}_{i \in GV} > 0$$

[0132] Il apparaît que ce problème d'optimisation, non-convexe, admet des minima locaux en plus de son minimum global. On rappelle qu'il est connu que la dérivée de la fonction de coût s'annule tant au niveau du minimum global qu'au niveau de chaque minimum local dans de telles circonstances. Le but de l'optimisation étant de dé-

terminer le minimum global, l'algorithme d'optimisation préféré ne doit donc pas se baser sur l'annulation de la dérivée de la fonction de coût. On utilise de préférence un algorithme génétique, notamment tel que décrit dans le document Goldberg, David E., Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

- [0133] La troisième étape 3 est répétée pour différentes valeurs du paramètre α , afin de déterminer un profil de la valeur RMSE ([Math 16]) en fonction de la somme des valeurs du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps.
- [0134] Chaque point du profil correspond ainsi à une résolution de l'équation [Math 17] pour une valeur donnée du paramètre α .
- [0135] Suivant les exigences liées à l'application considérée, c'est au concepteur de choisir un des points obtenus par optimisation, et donc un compromis rapidité/robustesse. Les performances d'estimation obtenues par le Filtre de Kalman résultant du choix du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps seront optimales, au sens du compromis défini par la valeur de α choisie.
- [0136] Le profil de la valeur RMSE en fonction de la somme des valeurs du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps présentant un profil hyperbolique, il est possible de déterminer un jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps en fonction du profil déterminé à l'issue de la deuxième étape, en fonction d'un seuil de valeur RMSE à ne pas dépasser et d'un seuil de somme des valeurs du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps à ne pas dépasser.
- [0137] Au cours d'une quatrième étape 4, on définit un seuil de valeur RMSE à ne pas dépasser et un seuil de somme des valeurs du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps à ne pas dépasser. On détermine ensuite le jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps, correspondant à une valeur de α , dont la valeur RMSE et la somme des valeurs du jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps satisfont respectivement chacun de ces deux seuils. Si plusieurs jeu $\{\tau_i\}_{i \in GV}$ de constantes de temps satisfont à ces deux seuils, le jeu choisi est celui présentant la somme des constantes de temps les plus faibles.
- [0138] Le procédé de calibration d'un estimateur par filtre de Kalman décrit ci-dessus peut être employé pour réaliser une détection de panne sur des mesures d'un capteur redondé mesurant une grandeur d'un équipement d'un dispositif. Selon l'application, le dispositif peut être un moteur d'aéronef et l'équipement peut être un doseur de carburant ou une commande de turbine à géométrie variable.
- [0139] Plus précisément, un tel système de commande repose sur l'utilisation d'un même filtre de Kalman (mais alimenté par des voies de mesures différentes) pour détecter et localiser une panne simple d'un capteur redondé afin d'accommoder l'acquisition sur

la voie saine au lieu de choisir arbitrairement une voie et potentiellement sélectionner la mauvaise voie. Dans une application à un aéronef, et à la commande du moteur d'un aéronef, il est alors possible d'éviter un événement moteur, tel qu'une perte de commande de poussée LOTC (acronyme « Loss of Thrust Control »).

- [0140] Un moyen de calcul comprend un observateur basé sur un filtre de Kalman, permettant de déterminer une mesure sélectionnée en fonction de signaux des capteurs de chaque équipement et du dispositif. L'observateur est bâti à partir d'un modèle représentatif du dispositif observé et du au moins un équipement et permet d'isoler une voie de mesure défaillante provenant d'une des voies de mesures de capteur redondé mesurant chaque équipement.
- [0141] La mesure sélectionnée est obtenue en ajoutant des biais additifs aux mesures des capteurs redondés de chaque équipement. Le filtre de Kalman permet alors, en faisant varier en temps réel les biais additifs sur chacune des entrées du modèle, de faire converger les sorties du modèle avec les mesures du dispositif. La convergence permet d'obtenir un résidu nul. Les biais obtenus représentent alors directement l'écart entre la mesure réelle de l'équipement commandé (déterminée par observation via son effet sur le dispositif) et la mesure choisie issue d'une des voies de mesure des capteurs redondés d'équipement.
- [0142] Le moyen de calcul comprend un observateur par filtre de Kalman, un moyen de comparaison, et un dispositif de sélection.
- [0143] L'observateur permet de déterminer, en tenant compte d'une ou plusieurs mesures de grandeur du dispositif, une estimation du biais de la mesure de la première voie de mesure du capteur redondé et une estimation du biais de la mesure de la deuxième voie de mesure du capteur redondé.
- [0144] Le moyen de comparaison est configuré pour déterminer un signal de sélection en fonction de la comparaison de l'estimation du biais de la première voie de mesure à un premier seuil, de l'estimation du biais de la deuxième voie de mesure à un premier seuil, et de l'estimation du biais de la première voie de mesure à l'estimation du biais de la deuxième voie de mesure. Les signaux booléens associés à ces comparaisons sont transmis à une table de vérité prédéterminée de sorte à déterminer le signal de sélection sel de la valeur à transmettre comme mesure sélectionnée.
- [0145] Le système de commande a été décrit en rapport avec une seule grandeur mesurée par deux voies de mesure spécifiques d'un capteur redondé. Néanmoins, le système de commande peut être étendu à au moins deux grandeurs mesurées chacune par deux voies de mesure spécifiques de capteurs redondés. Dans ce cas, un même observateur à filtre de Kalman est employé afin de déterminer l'estimation du biais des voies de mesure pour chaque grandeur prise en charge.
- [0146] Pour chaque grandeur, on dispose alors de deux estimations de biais, d'un moyen de

comparaison avec sa propre table de vérité et avec son propre seuil de comparaison, ainsi que d'un moyen de sélection.

[0147] Le système de commande permet :

- d'isoler, pour chaque capteur redondé, la voie en panne de la voie saine et de pouvoir ainsi se reconfigurer,
- d'utiliser le même filtre de Kalman alimentée par des voies de mesures différentes. Ainsi, contrairement à l'état de l'art qui utilise une banque de filtres de Kalman différents, cela permet d'optimiser le système de commande (réduction de l'impact sur la mémoire ou la charge CPU)
- d'obtenir une estimation du biais dépendant directement des mesures et facilement interprétable par la suite (contrairement aux résidus utilisés dans l'état de l'art)

[0148] Appliqué à un aéronef, et notamment à la commande d'un moteur d'un aéronef, le système de commande permet d'être robuste à la panne pendant le vol et de fournir un diagnostic pour remplacement en fin de mission.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de calibration d'un estimateur par filtre de Kalman compris dans un système de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, le système de commande comprenant au moins un capteur redondé configuré de sorte à déterminer une grandeur physique du au moins un équipement, le capteur redondé comprenant deux voies de mesure redondantes, le procédé de calibration comprenant les étapes suivantes :

- a. identification d'un ensemble de commandes de référence du dispositif réalisé dans une durée prédéterminée,
- b. détermination d'une fonction de coût fonction d'un jeu de constantes de temps définissant par ailleurs le filtre de Kalman, d'un seuil d'écart de grandeur mesurée entre les deux voies d'un même capteur redondé au-delà duquel on considère qu'un défaut est présent, d'un paramètre de compromis définissant la priorité donnée à la vitesse de convergence ou à la robustesse de l'estimateur, et de l'écart pour chaque équipement entre grandeur mesurée et grandeur estimée par l'estimateur par filtre de Kalman, l'écart étant calculé pour au moins deux instants compris dans la durée prédéterminée de l'ensemble de commandes de référence,
- c. optimisation par minimisation de la valeur de la fonction de coût en faisant varier le jeu de constantes de temps pour une valeur de paramètre de compromis,
- d. répétition de l'optimisation par minimisation pour au moins une autre valeur de paramètre de compromis, et
- e. détermination du jeu de constantes de temps associé à une valeur de paramètre de compromis dont la racine de l'erreur quadratique moyenne entre la valeur mesurée et la valeur estimée de position des équipements, et la somme des constantes de temps, sont inférieures chacune à un seuil, ledit jeu de constantes de temps calibrant l'estimateur par filtre de Kalman.

[Revendication 2]

Procédé de calibration selon la revendication 1, dans lequel, pour déterminer la valeur prise par la fonction de coût pour un jeu de constantes

de temps, on réalise les sous-étapes suivantes :

- a. détermination du gain du filtre de Kalman pour le jeu de constantes de temps et pour chaque point de fonctionnement autour duquel le dispositif a été linéarisé,
- b. détermination de la valeur estimée de la mesure du capteur redondé associé à chaque équipement du dispositif par l'intermédiaire de l'estimateur à filtre de Kalman dans tout l'ensemble de commandes de référence identifié et pour les au moins deux instants compris dans la durée de l'ensemble de commandes de référence.

[Revendication 3] Procédé de calibration selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel, pour réaliser l'optimisation par minimisation de la valeur de la fonction de coût, on utilise un algorithme génétique.

[Revendication 4] Procédé de calibration selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la fonction de coût notée J est exprimée par l'équation suivante :

$$J(\{\tau_i\}_{i \in GV}) = \alpha \sum_{i \in GV} \tau_i + (1 - \alpha) \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i \in GV} \frac{1}{Seuil_{LVDT_i}} \sqrt{(LVDT_{i_{reel}}(t) - LVDT_{i_{est}}(t))^2}$$

,
où :

GV est l'ensemble des équipements considérés compris dans le dispositif,

τ_i est la constante de temps associée à l'équipement i compris dans l'ensemble GV des équipements,

$Seuil_{LVDT_i}$ est le seuil de cross-check pour le capteur associé à l'équipement i ,

$LVD\mathcal{T}_{i_{reel}}$ est une position réelle d'un vérin de l'équipement i mesurée par le capteur associé à l'équipement i ,

$LVD\mathcal{T}_{i_{est}}$ est une position estimée d'un vérin de l'équipement i estimée par le filtre de Kalman.

α est la pondération entre la rapidité de convergence de l'estimateur et la robustesse de l'estimation, appelé paramètre de compromis,

t_f est une durée de l'ensemble de commandes de référence.

[Revendication 5] Procédé de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, ledit dispositif étant muni par ailleurs d'au moins un capteur apte à mesurer chacun une grandeur de fonctionnement du dispositif, et un capteur redondé pour chaque équipement de sorte à disposer de deux

voies de mesure pour chaque grandeur physique mesurée, le procédé de commande comprenant les étapes suivantes :

- a. on calibre un estimateur à filtre de Kalman par le procédé de calibration selon l'une quelconque des revendications 1 à 4,
- b. on détermine une mesure sélectionnée pour le au moins un équipement commandé, par l'estimateur à filtre de Kalman calibré, en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du dispositif et des mesures des voies de mesure du capteur redondé pour l'équipement commandé, puis
- c. on détermine une commande à destination du au moins un équipement en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du dispositif et de la mesure sélectionnée pour l'équipement commandé, et
- d. on détecte une panne d'une des voies de mesure du capteur redondé de sorte à en exclure la voie de mesure.

[Revendication 6]

Système de commande d'un dispositif muni d'au moins un équipement, le système de commande comprenant au moins un capteur apte à mesurer chacun une grandeur de fonctionnement du dispositif, et un capteur redondé pour chaque équipement, au moins un moyen de commande imbriquée configuré pour déterminer une commande à destination du au moins un équipement en fonction de la mesure d'au moins une grandeur de fonctionnement du dispositif et d'une mesure sélectionnée pour l'équipement commandé, le système de commande comprenant en outre un moyen de calcul configuré pour déterminer la mesure sélectionnée pour le au moins un équipement commandé, par un estimateur par filtre de Kalman, en fonction de la au moins une mesure de la grandeur de fonctionnement du dispositif et des mesures des voies de mesure du capteur redondé pour l'équipement commandé, le moyen de calcul étant en outre configuré pour détecter une panne d'une des voies de mesure du capteur redondé de sorte à en exclure la voie de mesure, dans lequel l'estimateur à filtre de Kalman est calibré par le procédé de calibration selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.

[Revendication 7]

Système de commande selon la revendication 6, dans lequel le dispositif est un moteur d'aéronef et les voies de mesure du capteur redondé mesurent la position des vérins de géométrie variable, et/ou la position de la valve de dosage carburant, et/ou les calages variables des stators

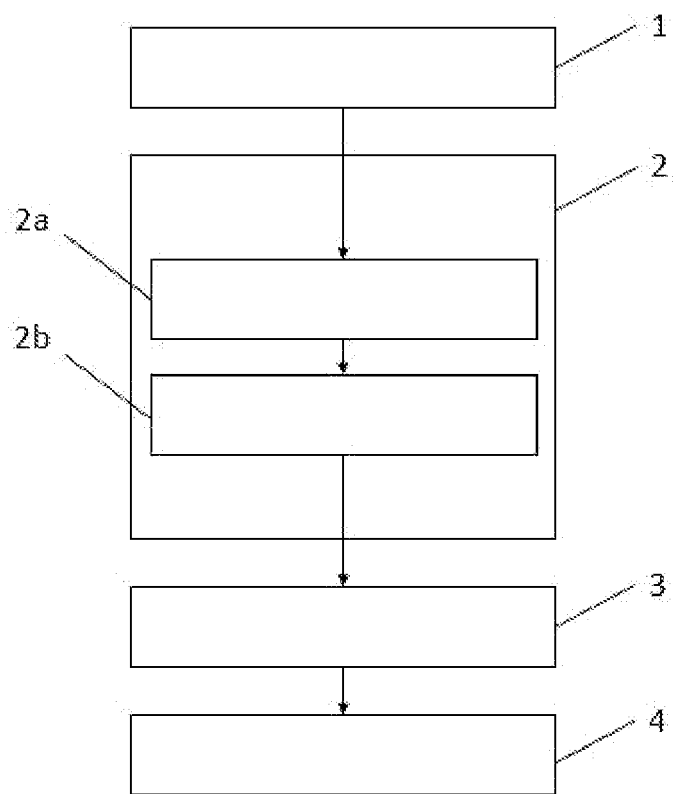
du compresseur haute pression du moteur, et/ou la mesure de la température en entrée du compresseur haute pression du moteur, et/ou la mesure de pression statique en entrée de la chambre de combustion du moteur.

[Revendication 8] Système de commande selon la revendication 7, dans lequel le capteur redondé est un capteur LVDT.

[Revendication 9] Système de commande selon l'une des revendications 7 ou 8, dans lequel l'équipement est un actionneur du moteur d'aéronef, par exemple un vérin.

[Revendication 10] Aéronef muni d'un système de commande selon l'une quelconque des revendications 6 à 9.

[Fig. 1]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 918985
FR 2302775

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		
X	Zhang Yang ET AL: "Dual-redundancy sensor fault diagnosis of fuel metering unit based on real-time residual window", CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2018), 19 juin 2018 (2018-06-19), XP093098065, Extrait de l'Internet: URL:https://digital-library.theiet.org/docserver/fulltext/conference/cp743/20180308.pdf?expires=1699019470&id=id&accname=ietid004534&checksum=58E25DE75B9E69C3C236E1F5E3FC9B42 [extrait le 2023-11-03]	6-10	B64D 45/00 G01M 15/00 G05B 17/00 G05B 23/00 G06F 17/00
A	* pages 537,539 - page 540; figures 3, 5 * -----	1-5	
E	WO 2023/148438 A1 (SAFRAN AIRCRAFT ENGINES [FR]) 10 août 2023 (2023-08-10) * pages 3,20 * -----	6-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G05B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
7 novembre 2023		Bassi, Luca	
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			

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2302775 FA 918985

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