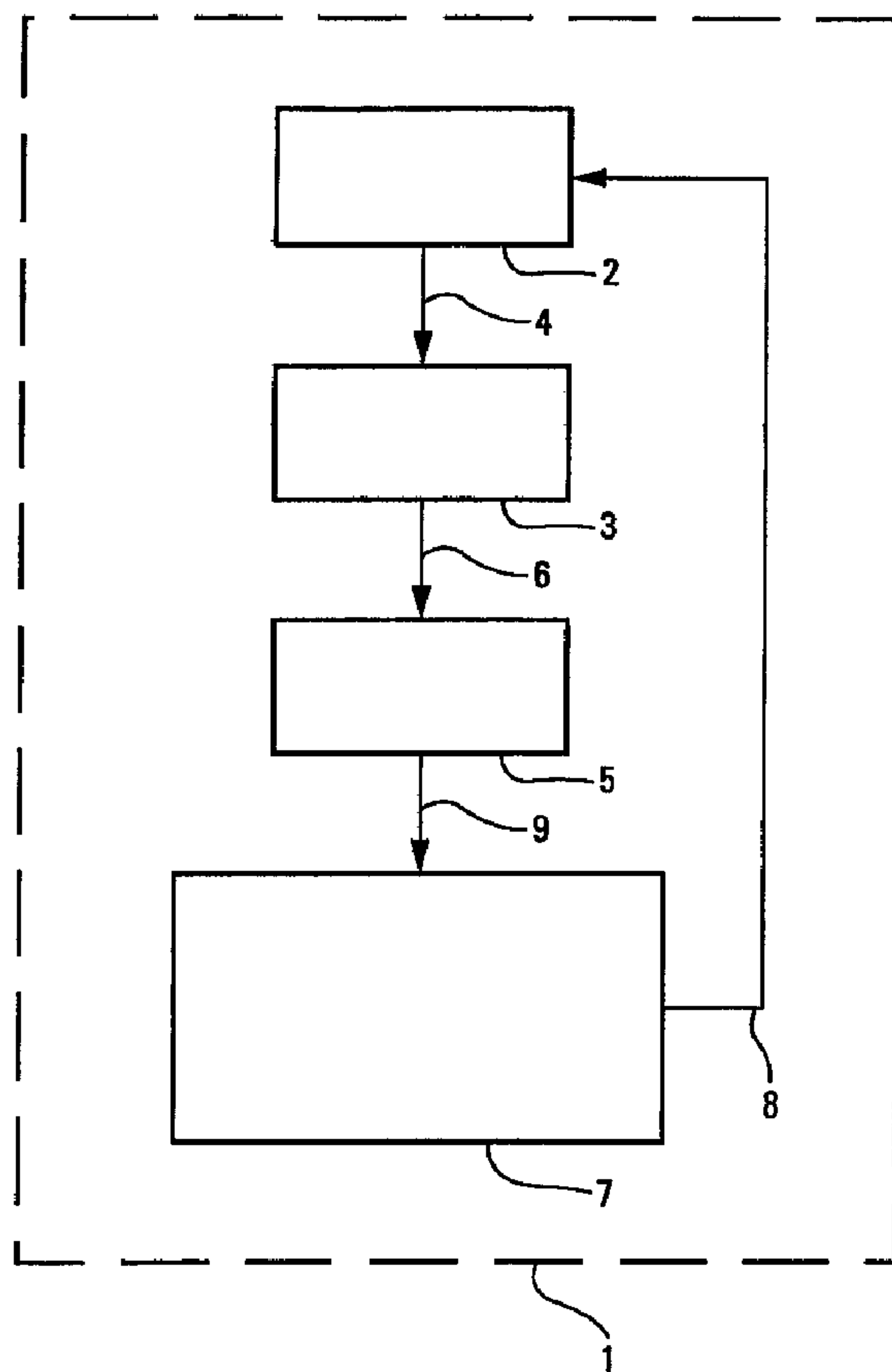




(22) Date de dépôt/Filing Date: 2002/10/08
 (41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2003/04/18
 (45) Date de délivrance/Issue Date: 2010/09/07
 (30) Priorité/Priority: 2001/10/18 (FR01 13 435)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G09B 9/02* (2006.01),
G05D 1/08 (2006.01), *G09B 9/08* (2006.01)
 (72) Inventeur/Inventor:
EGLIN, PAUL, FR
 (73) Propriétaire/Owner:
EUROCOPTER, FR
 (74) Agent: ROBIC

(54) Titre : PROCÉDE ET DISPOSITIF POUR DETERMINER EN TEMPS REEL LE COMPORTEMENT D'UN MOBILE,
EN PARTICULIER D'UN AERONEF
 (54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING IN REAL TIME THE BEHAVIOUR OF A MOVING OBJECT,
PARTICULARLY AN AIRCRAFT



(57) Abrégé/Abstract:

- Ledit dispositif (1) comporte des premiers moyens (2) pour déterminer, à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, un vecteur λ illustrant un état d'équilibre, des deuxièmes moyens (3) reliés auxdits premiers moyens (2),

(57) **Abrégé(suite)/Abstract(continued):**

pour déterminer, à partir de ce vecteur λ , les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire, des troisièmes moyens (5) reliés auxdits deuxièmes moyens (3), pour calculer, à partir d'au moins certaines de ces valeurs, la composante dynamique du comportement du mobile, et des quatrièmes moyens (7) reliés auxdits premiers et troisièmes moyens (2, 5), pour introduire cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire de manière à obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

A B R É G É

- Ledit dispositif (1) comporte des premiers moyens (2) pour déterminer, à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, un vecteur λ illustrant un état d'équilibre, des deuxièmes moyens (3) reliés auxdits premiers moyens (2), pour déterminer, à partir de ce vecteur λ , les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire, des troisièmes moyens (5) reliés auxdits deuxièmes moyens (3), pour calculer, à partir d'au moins certaines de ces valeurs, la composante dynamique du comportement du mobile, et des quatrièmes moyens (7) reliés auxdits premiers et troisièmes moyens (2, 5), pour introduire cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire de manière à obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

Procédé et dispositif pour déterminer en temps réel le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef.

La présente invention concerne un procédé et un dispositif pour déterminer en temps réel le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef.

On sait que, pour de nombreuses applications relatives à un aéro-
5 nef, tel qu'un avion ou un hélicoptère, en particulier pour des simulations pilotées, il est nécessaire de connaître le comportement de l'aéronef, c'est-à-dire l'ensemble de ses mouvements, dans tout le domaine de vol simulé de cet aéronef. Pour estimer ce comportement, on réalise généralement une modélisation des différents mouvements à prendre en compte.
10 Deux types de modélisation peuvent être utilisés à cet effet : une modélisation non linéaire et une modélisation linéaire.

Une modélisation non linéaire, qui permet de décrire le comportement de l'aéronef par un modèle non linéaire utilisant des équations de mécanique du vol, s'établit à partir de la connaissance des forces qui agissent sur l'aéronef. A ce sujet, on sait, par exemple, que les forces aérodynamiques évoluent avec le carré de la vitesse par rapport à l'air ou qu'une
15 voilure tournante d'un hélicoptère engendre des effets inertiels non linéaires.

Un modèle non linéaire représente très fidèlement la réalité avec
20 une description rigoureuse et complète des forces et des moments qui agissent sur l'aéronef. De plus, il est valable sur tout le domaine de vol de l'aéronef.

Toutefois, une telle modélisation non linéaire présente plusieurs inconvénients :

- 25
- elle est complexe et difficile à mettre en œuvre ;
 - elle nécessite une durée de calcul très longue ; et

– une correction du modèle non linéaire correspondant, qui suppose une très bonne connaissance des équations du modèle et de leurs paramètres pour identifier les paramètres influents et prévoir des modifications appropriées, est très complexe et difficile à mettre en œuvre.

5 En revanche, une modélisation linéaire qui permet de décrire les mouvements d'un aéronef par une équation linéaire (le plus souvent vectorielle, on fait alors appel à une représentation d'état) représente les états de l'aéronef par des relations très simples. Les paramètres qui composent ces relations sont les amortissements, les stabilités et les couplages de
10 l'aéronef, ainsi que les sensibilités de commande directement ressenties par le pilote. Ces paramètres sont donc facilement recalables par rapport au vol.

Une telle modélisation linéaire est donc simple et peut être mise en œuvre et corrigée, rapidement et facilement.

15 Toutefois, elle présente un inconvénient important. Cette modélisation linéaire n'est valable que localement, autour d'un état d'équilibre. Son domaine de validité est en principe limité :

- en amplitude (on est contraint de se déplacer suivant une "tangente" au point d'équilibre) ; et
- 20 – en fréquence (le nombre de modes propres qu'un modèle linéaire peut reproduire est directement lié à la dimension de son vecteur d'état).

Malgré tous ses avantages, cette modélisation linéaire ne peut donc pas être utilisée pour estimer, à tout instant et dans tout le domaine de vol, le comportement d'un aéronef.

25 La présente invention a pour objet de remédier à ces inconvénients. Elle concerne un procédé pour déterminer en temps réel, facilement et à coût réduit, le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef, et ceci sur tout le domaine de fonctionnement de ce mobile.

A cet effet, selon l'invention, ledit procédé est remarquable en ce que l'on réalise, de façon répétitive, les opérations successives suivantes :

- a) à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, on détermine un vecteur λ illustrant un état d'équilibre ;
- 5 b) à partir de ce vecteur λ , on détermine les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire ;
- c) à partir d'au moins certaines de ces valeurs, on calcule la composante dynamique du comportement du mobile ; et
- 10 d) on introduit cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire pour obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

Ainsi, grâce à l'invention, on utilise un modèle linéaire qui présente de nombreux avantages (simplicité, rapidité de calcul, ...), comme précité. De plus, grâce à sa mise à jour continue, ce modèle linéaire est utilisable
15 sans restriction sur tout le domaine de fonctionnement (domaine de vol dans le cas d'un aéronef) du mobile.

De plus, ledit procédé conforme à l'invention peut être mis en œuvre pour tout type de mobile (hélicoptère, avion, automobile, fusée, missile, ...) volant ou non.

20 De façon avantageuse, les paramètres du modèle linéaire, dont on détermine les valeurs à l'étape b), sont :

- un vecteur d'état ;
- un vecteur de commande ;
- un vecteur d'observation ;
- 25 – une matrice d'état ;
- une matrice de commande ; et
- une matrice d'observation.

Selon l'invention, on détermine à l'étape b) les valeurs desdits paramètres :

- α) à l'aide d'un modèle non linéaire, ce qui est toutefois assez lourd, car il est nécessaire de déterminer les valeurs à chaque cycle ; ou
- β) à l'aide d'une base de données préétablie ; ou
- γ) à l'aide de relations, par exemple des régressions polynomiales, qui permettent de définir ces paramètres directement à partir du vecteur λ , ce qui correspond à un mode de réalisation simplifié ; ou
- δ) à l'aide d'une combinaison d'au moins deux des méthodes α), β) et γ) précédentes.

La base de données (utilisée dans la méthode β précitée) peut être réactualisée à volonté sans contrainte (sur la dimension des vecteurs et matrices qui la composent) autre que la capacité du calculateur utilisé. Selon l'invention, cette base de données peut être établie :

- soit à l'aide d'un modèle non linéaire ;
- soit à partir de mesures réalisées lors d'au moins un déplacement dudit mobile. Dans ce dernier cas, on obtient un modèle particulièrement fidèle à la réalité.

La présente invention concerne également un dispositif pour déterminer en temps réel le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef, et susceptible de mettre en œuvre le procédé précité.

Selon l'invention, ledit dispositif est remarquable en ce qu'il comporte :

- des premiers moyens pour déterminer, à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, un vecteur λ illustrant un état d'équilibre ;
- des deuxièmes moyens reliés auxdits premiers moyens, pour déterminer, à partir de ce vecteur λ , les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire ;

- des troisièmes moyens reliés auxdits deuxièmes moyens, pour calculer, à partir d'au moins certaines de ces valeurs, la composante dynamique du comportement du mobile ; et
- des quatrièmes moyens reliés auxdits premiers et troisièmes moyens, pour introduire cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire de manière à obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

Les figures du dessin annexé feront bien comprendre comment l'invention peut être réalisée.

La figure 1 est le schéma synoptique d'un dispositif conforme à l'invention.

La figure 2 représente un graphique présentant l'évolution de la commande de tangage d'un hélicoptère au cours d'une accélération/décélération en palier, qui permet de bien mettre en évidence l'action du procédé conforme à la présente invention.

Le dispositif 1 représenté schématiquement sur la figure 1 et conforme à l'invention, est destiné à déterminer en temps réel le comportement d'un mobile non représenté, en particulier d'un aéronef et notamment d'un hélicoptère.

A cet effet, ledit dispositif 1 réalise une modélisation linéaire des mouvements du mobile, comme précisé ci-dessous.

Tout d'abord, on illustre le principe de linéarisation, en considérant un modèle régi par des équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, U) & \text{(équation d'état)} \\ Y = g(X, U) & \text{(équation d'observation)} \end{cases}$$

avec :

- X : vecteur d'état (dimension n)
- U : vecteur de commande (dimension m)
- Y : vecteur d'observation (dimension p)

La linéarisation d'un modèle non linéaire se base d'abord sur un équilibre. On satisfait pour cela la condition suivante (sachant qu'il existe une infinité d'équilibres possibles) :

$$0 = f(X_0, U_0)$$

5 Par une hypothèse de petits mouvements (x, u, y) , on obtient autour de l'équilibre :

$$- X = X_0 + x$$

$$- U = U_0 + u$$

$$- Y = Y_0 + y.$$

10 Par une méthode de dérivation, on estime les matrices d'état A, de commande B et d'observation C et D du modèle linéaire tangent au point d'équilibre (X_0, U_0, Y_0) . Ce modèle est régi par la loi de comportement suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A.x + B.u \\ y = C.x + D.u \end{cases}$$

15 Les composantes des matrices A, B, C et D sont obtenues par dérivation, respectivement à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial X_j} (X_0, U_0) \\ b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial U_j} (X_0, U_0) \\ c_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial X_j} (X_0, U_0) \\ d_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial U_j} (X_0, U_0) \end{cases}$$

Ledit dispositif 1 qui met en œuvre le procédé conforme à l'invention et qui est, par exemple, intégré dans un calculateur ou réalisé sous forme d'un calculateur comporte, selon l'invention :

20

- des premiers moyens 2, pour déterminer, à partir d'un modèle linéaire courant précisé ci-dessous, qui modélise le comportement du mobile, un vecteur λ illustrant un état d'équilibre :

$$\lambda = \lambda (X, Y, U) ;$$

- 5
- des deuxièmes moyens 3 reliés par une liaison 4 auxdits premiers moyens 2, pour déterminer, à partir de ce vecteur λ , les valeurs à l'équilibre de paramètres [matrice d'état A, matrice de commande B, matrices d'observation C et D, point d'équilibre (X0, U0, Y0)] dudit modèle linéaire :

10

- . $X0 = X0(\lambda)$

- . $U0 = U0(\lambda)$

- . $Y0 = Y0(\lambda)$

- . $A = A(\lambda)$

- . $B = B(\lambda)$

15

- . $C = C(\lambda)$

- . $D = D(\lambda) ;$

- des troisièmes moyens 5 reliés par une liaison 6 auxdits deuxièmes moyens 4, pour calculer, à partir d'au moins certaines (X0 et U0) de ces valeurs, la composante dynamique du comportement du mobile :

20

$$\begin{cases} x = X - X0 \\ u = U - U0 \end{cases} ; \text{ et}$$

- des quatrièmes moyens 7 reliés respectivement par des liaisons 8 et 9 auxdits premiers et troisièmes moyens 2 et 5, pour introduire cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire de manière à obtenir un nouveau modèle linéaire courant (et en déduire le comportement dudit mobile) :
- 25

$$\left\{ \begin{array}{l} dx/dt = A.x + B.u \\ x = \int(dx/dt).dt \\ y = C.x + D.u \\ X = X0 + x \\ Y = Y0 + y \end{array} \right.$$

Selon l'invention, lesdits moyens 2, 3, 5 et 7 réalisent leurs traitements respectifs précités de façon répétitive et successive.

Les moyens 7 réalisent la mise en œuvre du modèle linéaire (isolé).
 5 Ceci correspond à la partie habituellement résolue et qui n'est valide que pour un seul point de fonctionnement du mobile, en particulier pour un point de vol dans le cas d'un aéronef.

En outre, les moyens 2 et 3 permettent d'identifier l'équilibre auquel le point de fonctionnement courant (point de vol courant) [qui est
 10 contenu dans le vecteur d'état X] se réfère. L'équilibre est alors caractérisé par le vecteur λ . La dimension et les composantes de ce vecteur λ sont fixées en fonction du rapport représentativité/complexité recherché pour le dispositif 1.

On notera que, pour un hélicoptère par exemple, un bon exemple
 15 de composante de λ peut être la vitesse d'avancement en palier VH qui, comme on le sait, a un effet fortement non linéaire sur le comportement de l'hélicoptère.

Par ailleurs, les moyens 5 permettent par soustraction de déduire la part dynamique du comportement du mobile.

20 La figure 2 montre un exemple de l'efficacité de cette identification. Cette figure 2 représente, pour un hélicoptère, l'évolution de la commande de tangage DTSP au cours d'une accélération/décélération en palier, en fonction du temps t exprimé en secondes s . La commande DTSP est décomposée en une partie statique Pst et une partie dynamique Pdy.
 25 La partie statique Pst apparaît clairement lissée, la partie dynamique Pdy

reste, quant à elle, centrée autour de 0 et contient toutes les informations de "hautes fréquences". L'un des avantages du procédé conforme à l'invention (qui prévoit le vecteur λ caractérisant l'équilibre) est que cette séparation statique/dynamique se fait sans introduction de retard, alors que si l'on avait employé un filtre extérieur aux équations, on aurait introduit un retard dans l'identification de X_0 , U_0 , Y_0 dégradant fortement la qualité du résultat. De plus, un filtre extérieur aurait dû faire l'objet d'un réglage en fréquence de coupure, problème compliqué, cette fréquence pouvant être variable suivant le mobile simulé ou le point de fonctionnement. Le procédé conforme à l'invention est optimal, car il met en œuvre un filtrage auto-adapté.

Ainsi, grâce à l'invention, on est en mesure de changer de manière continue de modèle linéaire, en fonction du point de fonctionnement courant (point de vol courant par exemple). A chaque instant de la mise en œuvre du procédé, on est capable d'identifier et de calculer :

- l'équilibre X_0 , U_0 , Y_0 , auquel le point de fonctionnement se rapporte ;
- les paramètres du modèle linéaire (matrices A, B, C et D) associés à cet équilibre ; et
- la part dynamique P_{dy} dans le vecteur d'état X, cette dernière étant la seule qu'il faut injecter dans le modèle linéaire. Cela revient à faire un filtrage du vecteur d'état X.

La présente invention permet donc d'utiliser, pour déterminer le comportement d'un mobile, un modèle linéaire qui présente de nombreux avantages (simplicité, rapidité de calcul, ...), et ceci sur tout le domaine de fonctionnement du mobile.

Le procédé conforme à l'invention est destiné principalement à des applications en temps réel (simulations pilotées). Son utilisation peut concerner tous types de mobiles (hélicoptère, avion, automobile, fusée, missile, ...), qu'ils soient volants ou non.

Ledit modèle linéaire peut être évolutif, aussi bien dans sa base de données que dans son niveau de modélisation.

Selon l'invention, les moyens 3 déterminent les valeurs des paramètres A, B, C, D, X0, U0 et Y0 du modèle linéaire :

- 5 α) à l'aide d'un modèle non linéaire, ce qui est toutefois assez lourd, car il est nécessaire de déterminer les valeurs à chaque cycle ; ou
- β) à l'aide d'une base de données préétablie ; ou
- γ) à l'aide d'une loi, par exemple une régression polynomiale, permettant de définir ces paramètres directement à partir du vecteur λ , ce qui
- 10 correspond à un mode de réalisation simplifié ; ou
- δ) à l'aide d'une combinaison d'au moins deux des méthodes α), β) et γ) précédentes.

La base de données utilisée dans la méthode β précitée peut être établie :

- 15 – soit à l'aide d'un modèle non linéaire ;
- soit par une identification sur des résultats mesurés lors d'au moins un déplacement du mobile.

20 Ladite base de données (matrices A, B, C, D et vecteurs d'équilibre X0, U0, Y0) peut être réactualisée à volonté sans contrainte sur la dimension des vecteurs et des matrices qui la composent, autre que la capacité du calculateur utilisé. De plus, si cette base de données provient d'identifications expérimentales sur un mobile réel, on est alors en mesure de reproduire avec le modèle correspondant un comportement extrêmement proche de la réalité.

25 Tout comme un modèle non linéaire usuel, ledit modèle peut recevoir des modules de calcul supplémentaires destinés à enrichir sa représentativité. Dans le cas d'un hélicoptère, on peut citer à titre d'exemple les adaptations suivantes :

- prise en compte de l'effet du vent ;
- prise en compte de l'effet de sol ;
- rajout d'un modèle de train d'atterrissage.

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour déterminer en temps réel le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef, caractérisé en ce que l'on réalise, de façon répétitive, les opérations successives suivantes :

- a) à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, on détermine un vecteur λ illustrant un état d'équilibre ;
- b) à partir de ce vecteur λ , on détermine les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire ;
- c) à partir d'au moins certaines de ces valeurs, on calcule la composante dynamique du comportement du mobile ; et
- d) on introduit cette composante dynamique dans ledit modèle linéaire pour obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les paramètres du modèle linéaire, dont on détermine les valeurs à l'étape b), sont :

- un vecteur d'état ;
- un vecteur de commande ;
- un vecteur d'observation ;
- une matrice d'état ;
- une matrice de commande ; et
- une matrice d'observation.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que, à l'étape b), on détermine les valeurs desdits paramètres du modèle linéaire, au moins à l'aide d'un modèle non linéaire.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que, à l'étape b), on détermine les valeurs desdits paramètres du modèle linéaire, au moins à l'aide d'au moins une base de données préétablie.

5 5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite base de données est établie à l'aide d'un modèle non linéaire.

6. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite base de données est établie à partir de mesures réalisées lors d'au moins un déplacement dudit mobile.

10 7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que, à l'étape b), on détermine les valeurs desdits paramètres du modèle linéaire, au moins à l'aide de relations permettant de définir ces paramètres directement à partir du vecteur λ .

15 8. Dispositif pour déterminer en temps réel le comportement d'un mobile, en particulier d'un aéronef, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des premiers moyens (2) pour déterminer, à partir d'un modèle linéaire courant modélisant le comportement du mobile, un vecteur λ illustrant un état d'équilibre ;
- des deuxièmes moyens (3) reliés auxdits premiers moyens (2), pour déterminer, à partir de ce vecteur λ , les valeurs à l'équilibre de paramètres dudit modèle linéaire ;
- des troisièmes moyens (5) reliés auxdits deuxièmes moyens (3), pour calculer, à partir d'au moins certaines de ces valeurs, la composante dynamique du comportement du mobile ; et
- des quatrièmes moyens (7) reliés auxdits premiers et troisièmes moyens (2, 5), pour introduire cette composante dynamique dans ledit modèle

linéaire de manière à obtenir un nouveau modèle linéaire courant et en déduire le comportement dudit mobile.

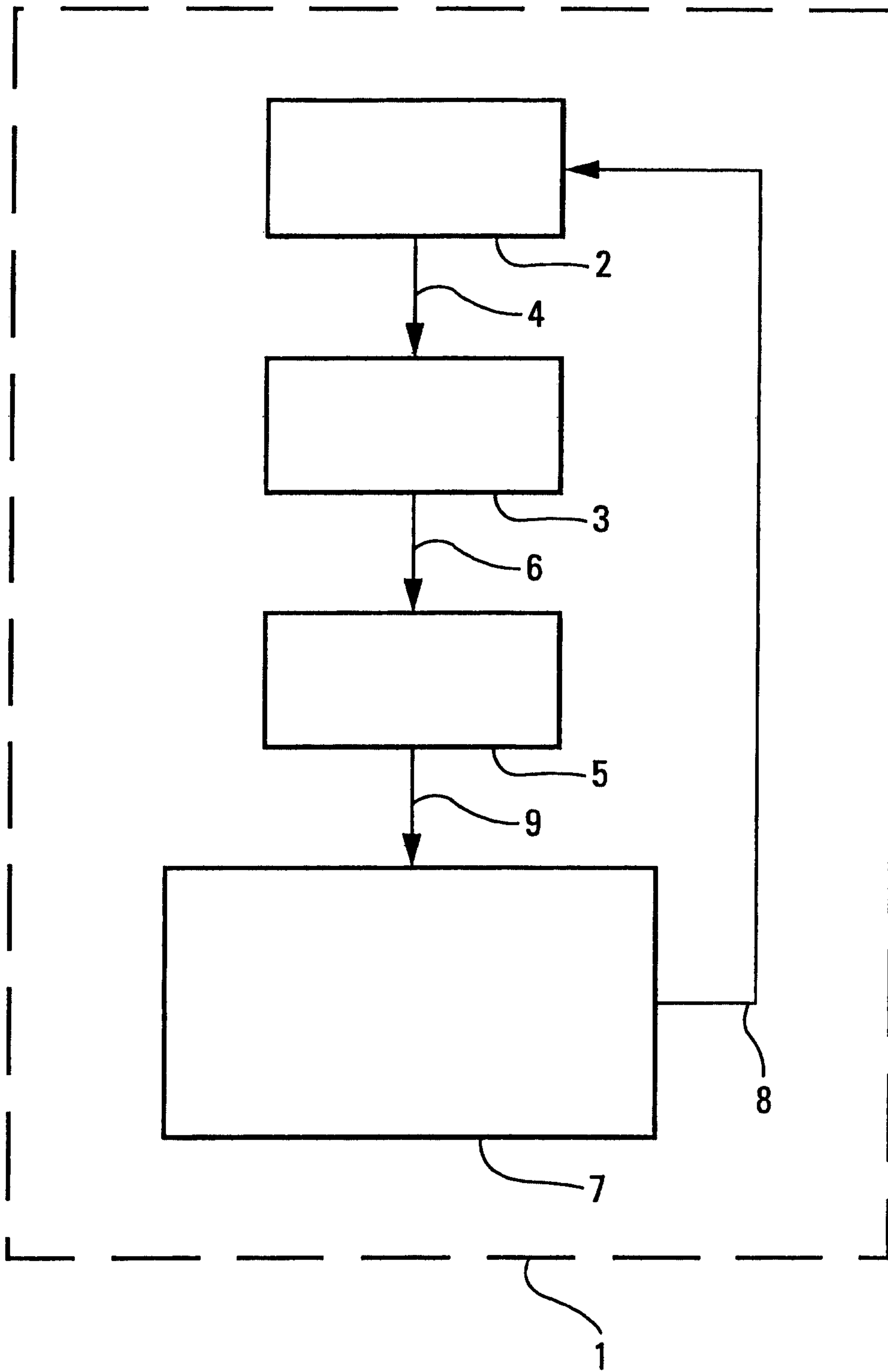


Fig. 1

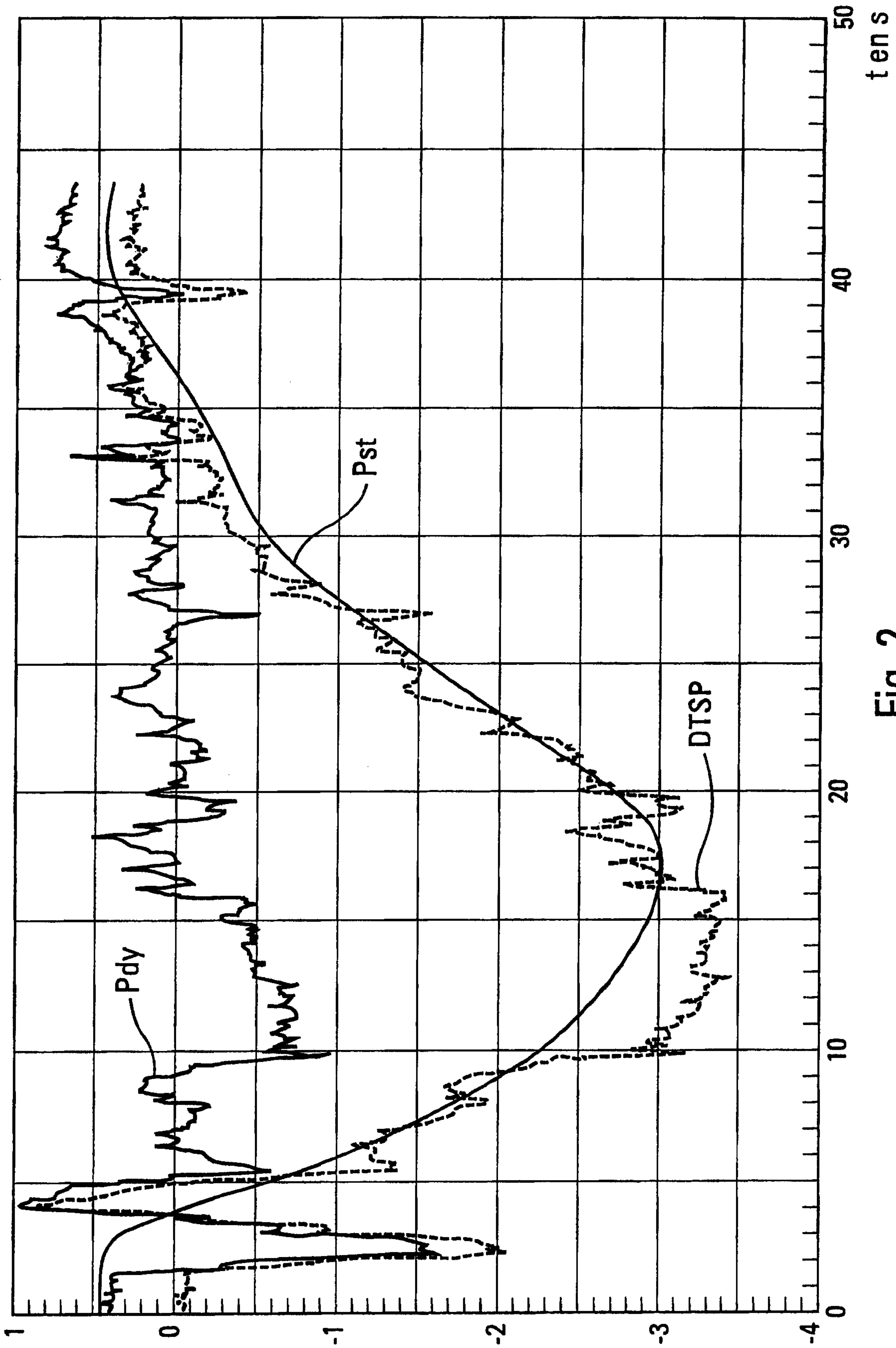


Fig. 2

