



(51) Classification internationale des brevets :
G06F 17/10 (2006.01) *G05B 13/02* (2006.01)
B60W 10/06 (2006.01) *G05B 19/18* (2006.01)
F16H 61/70 (2006.01) *G05B 19/44* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2016/051110

(22) Date de dépôt international :
11 mai 2016 (11.05.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1554369 15 mai 2015 (15.05.2015) FR

(71) Déposants : INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
APPLIQUÉES DE LYON [FR/FR]; 20 Avenue Albert
Einstein, 69621 Villeurbanne (FR). CENTRE NATION-
AL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR];
3 rue Michel Ange, 75016 Paris (FR). UNIVERSITÉ
CLAUDE BERNARD LYON 1 [FR/FR]; 43, Boulevard
du Onze Novembre 1918, 69100 Villeurbanne (FR).
ECOLE CENTRALE DE LYON [FR/FR]; 36 Avenue
Guy de Collongue, 69134 ECULLY Cedex (FR).

(72) Inventeurs : ABRY, Frédéric; 147 rue Léon Blum, 69100
Villeurbanne (FR). BRUN, Xavier; 4 rue Jean Collet,
69330 Meyzieu (FR).

(74) Mandataires : COLOMBO, Michel et al.; Innovation
Competence Group, 310 avenue Berthelot, 69372 LYON
cedex 08 (FR).

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

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

Publiée :

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

(54) Title : METHOD OF ACQUIRING THE TIME DERIVATIVE OF A PHYSICAL QUANTITY

(54) Titre : PROCÉDÉ D'ACQUISITION DE LA DÉRIVÉE TEMPORELLE D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE

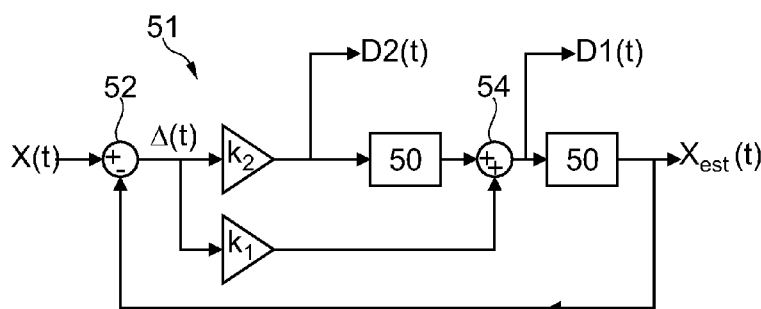


Fig. 4

(57) Abstract : The invention relates to a method of acquiring the time derivative of a physical quantity comprising the estimation of the time derivative with the aid of the following relation: $D1(t) = D_{est} + K_1 * \Delta(t)$, where: $- K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$, where: $|X(t)|$ is the absolute value of the value $X(t)$ measured for the physical quantity, $|\Delta(t)|$ is the absolute value of a deviation $\Delta(t)$ between the value $X(t)$ and an estimation $X_{est}(t)$ of this value $X(t)$, τ , α and L are predetermined numerical parameters whose values are independent of the values $X(t)$, $- D1_{est}$ is an estimation of the estimation $D1(t)$ which takes: either a value $D1_{est}(t)$ calculated with the instant t , K_1 then having the value $K_1(t)$ calculated at the instant t , or a value $D1_{est}(t-1)$ calculated at the instant $t-1$, K_1 then having the value $K_1(t-1)$ calculated at the instant $t-1$.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



L'invention concerne un procédé d'acquisition de la dérivée temporelle d'une grandeur physique, comportant l'estimation de la dérivée temporelle à l'aide de la relation suivante: $D1(t) = D_{est} + K_1 * \Delta(t)$, où: - $K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$, où: $|X(t)|$ est la valeur absolue de la valeur $X(t)$ mesurée de la grandeur physique, $|\Delta(t)|$ est la valeur absolue d'un écart $\Delta(t)$ entre la valeur $X(t)$ et une estimation $X_{est}(t)$ de cette valeur $X(t)$, τ , α et L sont des paramètres numériques prédéterminés dont les valeurs sont indépendantes des valeurs $X(t)$, - $D1_{est}$ est une estimation de l'estimation $D1(t)$ qui prend: soit une valeur $D1_{est}(t)$ calculée à l'instant t , K_1 ayant alors la valeur $K_1(t)$ calculée à l'instant t , soit une valeur $D1_{est}(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$, K_1 ayant alors la valeur $K_1(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$.

PROCÉDÉ D'ACQUISITION DE LA DÉRIVÉE TEMPORELLE D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE

[001] L'invention concerne un procédé d'acquisition de la dérivée temporelle d'une
5 grandeur physique. L'invention concerne également un calculateur et un support d'enregistrements d'informations pour la mise en œuvre de ce procédé. Enfin, l'invention concerne aussi un ensemble comportant un objet mobile et le calculateur.

[002] L'invention concerne notamment le domaine de l'automatique (« control theory » en langue anglaise). Il existe des procédés connus pour acquérir la dérivée
10 temporelle d'une grandeur physique en temps réel. Typiquement, l'acquisition de la dérivée temporelle consiste à réaliser une estimation automatiquement de la dérivée temporelle de la grandeur physique à partir de mesure de cette grandeur physique. On connaît notamment, à cet effet, des procédés dits de différentiation (« differentiator » en langue anglaise), qui permettent d'estimer la dérivée sans avoir
15 besoin de connaître au préalable un modèle physique qui relie la dérivée temporelle à la grandeur physique (et ce par opposition à d'autres types de procédés connus tels que les filtres de Kalman). Parmi ces procédés de différentiation, il existe notamment des procédés dits algébriques et des procédés utilisant la technique dite des modes glissants (« sliding mode control » en langue anglaise).

[003] Un exemple de procédé de différentiation algébrique est par exemple décrit
20 dans la thèse de doctorat de L. Sidhom, « Sur les différentiateurs en temps réel : algorithmes et applications », 2011, INSA Lyon, France, accessible à l'adresse internet suivante : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701576>, et notamment à la section 1.2 de ce document. Ces procédés de différentiation algébrique ont
25 cependant pour inconvénient d'être compliqués à mettre en œuvre. Ils présentent en outre une robustesse limitée face à des variations de fréquence et/ou d'amplitude du signal à dériver.

[004] C'est pourquoi il est préférable d'avoir recours à des procédés de différentiation à modes glissants à boucle fermée. De tels procédés sont par exemple
30 décrits dans la thèse de doctorat de L. Sidhom précédemment citée, notamment à la section 1.4 de ce document.

[005] Ces procédés comportent notamment :

- a) la mesure, par un capteur électronique, de la valeur d'une grandeur physique ;
- b) l'acquisition, par un calculateur électronique, de la valeur mesurée par ledit
35 capteur, notée $X(t)$, pour chaque instant t du temps ;
- c) le calcul d'une estimation, notée $D1(t)$, de la dérivée première de la grandeur physique à l'instant t , ce calcul étant réalisé à partir d'un écart $\Delta(t)$ entre :
 - la valeur $X(t)$ de la grandeur physique mesurée à l'instant t , et
 - une estimation $X_{\text{est}}(t-1)$ de cette valeur à cet instant t , obtenue en intégrant
40 l'estimation, notée $D1(t-1)$, de la dérivée de cette grandeur physique calculée

pour un instant $t-1$ qui précède immédiatement l'instant t , cette intégration étant réalisée entre les instants $t-1$ et t .

[006] Un inconvénient de ces procédés réside dans la complexité de leur utilisation.

En effet, l'étape c) précédemment décrite est typiquement paramétrée par un certain

5 nombre de paramètres que l'utilisateur doit régler au préalable. Or, ces paramètres sont souvent très dépendants du signal représentatif de la grandeur physique à dériver, par exemple de la fréquence, de l'amplitude ou encore du bruit de ce signal. Ainsi, lesdits paramètres doivent être réglés à chaque fois qu'on change le type de signal à dériver. Cela constitue un handicap important lorsqu'on ne connaît pas à
10 l'avance les caractéristiques spectrales du signal dont on veut acquérir la dérivée, ou encore lorsque la fréquence de ce signal varie au cours du temps.

[007] Un autre inconvénient est que ces procédés comportent typiquement des calculs numériques complexes tels que l'évaluation de fonctions discontinues ou des lois de puissance non entières, telles que des racines carrées, qui sont coûteux en
15 ressources informatiques. Ainsi, le temps nécessaire pour effectuer ce calcul est important. Cela n'est pas compatible avec les exigences propres aux systèmes en temps réel, qui sont soumis à des contraintes temporelles très strictes.

[008] De l'état de la technique est également connu de :

- Xinming Yan et Al : « Comparison of differentiation schemes for the velocity and
20 acceleration estimations of a pneumatic system », The 19th world congress of the international federation of automatic control, 27/08/2014, pages 49-54,

- Girin A et Al : « High-Order Sliding mode Controllers of an Electropneumatic Actuator : Application to an Aeronautic Benchmark », IEEE Transactions on control
25 systems technology, IEEE Service Center, New York, Vol. 17, N°3, 2009-05, pages 633-645.

[009] Il existe donc un besoin pour un procédé d'acquisition de la dérivée temporelle d'une grandeur physique en temps réel, qui présente une complexité de calcul réduite et qui soit facilement utilisable quelle que soit la nature du signal représentatif de cette grandeur physique dont on acquière la dérivée.

30 [0010] L'invention concerne donc un tel procédé conforme à la revendication 1.

[0011] De cette manière, la dérivée de la grandeur physique est estimée au moyen d'un gain dont la valeur est réactualisée, en fonction, notamment, de l'amplitude de la valeur mesurée de la grandeur physique et de l'écart. La valeur du gain est ainsi automatiquement adaptée en fonction du signal représentatif de la grandeur physique
35 que l'on cherche à dériver. De fait, l'utilisateur n'a plus à régler lui-même cette valeur du gain. De plus, les paramètres α et L peuvent n'être réglés qu'une seule fois en usine, sans avoir aucune connaissance sur la grandeur physique qui va être dérivée. Ensuite, les valeurs de ces paramètres peuvent être conservées pour dériver des signaux différents qui présentent des fréquences différentes tout en obtenant des
40 résultats parfaitement satisfaisants. Enfin, l'estimation nécessite moins de ressources

informatiques, du fait de l'absence de fonctions compliquées à calculer telles que des lois de puissance non entières.

[0012] Les modes de réalisation de l'invention peuvent présenter une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes.

5 [0013] Selon un autre aspect, l'invention concerne un support d'enregistrement d'informations, comportant des instructions pour l'exécution du procédé revendiqué.

[0014] Selon un autre aspect, l'invention concerne un calculateur électronique pour la mise en œuvre du procédé revendiqué.

10 [0015] Selon un autre aspect, l'invention concerne un ensemble pour estimer automatiquement la vitesse de déplacement d'un objet mobile en mettant en œuvre le calculateur électronique revendiqué.

[0016] 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 :

15 - les figures 1 et 2 sont des illustrations schématiques d'un ensemble pour acquérir des valeurs des dérivées première et seconde d'une grandeur physique ;

- la figure 3 illustre schématiquement une unité de calcul de l'ensemble des figures 1 et 2 ;

20 - la figure 4 est un schéma synoptique d'un algorithme pour acquérir des valeurs des dérivées première et seconde d'une grandeur physique ;

- la figure 5 est un ordigramme d'un procédé implémentant l'algorithme de la figure 4 pour acquérir des valeurs des dérivées première et seconde d'une grandeur physique ;

- la figure 6 illustre un exemple d'un signal à dériver ;

25 - les figures 7A et 7B illustrent respectivement l'évolution en fonction du temps des dérivées première et seconde du signal de la figure 6, calculées à l'aide d'un algorithme de dérivation selon l'état de la technique ;

30 - les figures 8A et 8B illustrent respectivement l'évolution en fonction du temps des dérivées première et seconde du signal de la figure 6, calculées à l'aide d'un autre algorithme de dérivation selon l'état de la technique ;

- les figures 9A et 9B illustrent respectivement l'évolution en fonction du temps des dérivées première et seconde du signal de la figure 6, calculées suivant le procédé de la figure 5 ;

35 - les figures 10A et 10B illustrent respectivement l'évolution en fonction du temps, de valeurs de gains utilisés pour obtenir les résultats des figures, respectivement, 8A et 8B ;

- les figures 11A et 11B illustrent respectivement l'évolution, en fonction du temps, de valeurs de gains pour obtenir les résultats des figures, respectivement, 9A et 9B ;

- la figure 12 est un schéma synoptique d'un autre mode de réalisation d'un algorithme pour acquérir des valeurs de la dérivée première d'une grandeur physique.

[0017] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments.

5 [0018] Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détails.

[0019] La figure 1 représente un ensemble 2 pour acquérir automatiquement la dérivée temporelle d'une grandeur physique. Dans cet exemple, la dérivée temporelle est la vitesse de déplacement d'un objet matériel 4 mobile par rapport à un repère R
10 de l'espace.

[0020] Dans cette description, sauf précision contraire, le terme de dérivée d'une grandeur fait référence à une dérivation mathématique de cette grandeur par rapport à la variable temps.

[0021] L'ensemble 2 comporte :

15 - l'objet 4,

- un capteur 6 électronique, apte à acquérir la valeur d'une grandeur physique représentative de la position dudit objet dans le repère R, et

- une unité de calcul 8 apte à estimer automatiquement la dérivée première de la grandeur physique représentative de la position de l'objet, à partir de la valeur
20 mesurée par le capteur 6. Dans cet exemple, cette dérivée première correspond à la vitesse de déplacement de l'objet 4 dans le repère R. L'unité 8 est ici une unité de calcul électronique et sera décrite plus en détail dans ce qui suit.

[0022] La figure 2 représente plus en détail un exemple de réalisation de l'ensemble 2. Plus précisément, la figure 2 représente l'ensemble 2 incluant un système
25 électrohydraulique 10. Ce système 10 comporte un vérin 12 hydraulique.

[0023] Le vérin 12 comporte :

- un cylindre 14,

- une tige 16 mobile en déplacement le long d'un axe 18 dans le sens de sa longueur,

30 - un piston 20 solidaire sans degré de liberté de la tige 16, ce piston 20 partageant l'intérieur du cylindre 14 en deux volumes distincts 22 et 24 ;

- une centrale hydraulique 26, qui commande le vérin 12.

[0024] La centrale 26 est notamment configurée pour injecter ou retirer un fluide à l'intérieur du cylindre 14, en réponse à un signal de commande, de manière à
35 contrôler le déplacement du piston 20 dans le cylindre 14. Par exemple, la centrale 26 est reliée fluidiquement aux volumes 22 et 24 au moyen de conduites 28, 30. Typiquement, la centrale 26 injecte un fluide dans le volume 22 et, simultanément, retire un fluide du volume 24. Cela engendre un déplacement du piston 20 et donc un déplacement de la tige 16.

[0025] Par exemple, le système 10 et l'unité 8 sont ceux décrits à la section 3.2 de la thèse de doctorat de L. Sidhom précédemment citée.

[0026] Dans cet exemple, on souhaite commander le vérin 12, au moyen d'une loi de commande prédéfinie. On considère ici que l'état du vérin 12 peut être représenté par la position du piston 20 au sein du cylindre par rapport au repère R de l'espace. Ici, ce repère R comporte l'axe 18 et un point de référence O appartenant à l'axe 18. Ainsi, dans cet exemple, le piston 20 forme l'objet 4. Par exemple, on utilise la loi de commande connue sous le terme de « backstepping » en langue anglaise.

[0027] La plupart des lois de commande nécessitent de connaître la position, mais aussi la vitesse et l'accélération de l'objet 4. Cependant, l'utilisation d'un accéléromètre et d'un capteur de vitesse à cette seule fin est coûteuse et complique la réalisation de l'ensemble 2. C'est pourquoi il est intéressant de déterminer ces informations seulement à l'aide d'un capteur de position et de calculer ensuite les dérivées première et seconde de la position en temps réel.

[0028] Ainsi, dans cette description, la grandeur physique dont on cherche à acquérir la dérivée temporelle est la position du piston 20. On note X cette grandeur physique. Cette position est par exemple connue en mesurant le déplacement de la tige 16 le long de l'axe 18 à l'aide du capteur 6. Ici, on souhaite acquérir les dérivées première et seconde de la grandeur X qui correspondent, respectivement, à la vitesse et à l'accélération de l'objet 4.

[0029] Dans cet exemple, le capteur 6 mesure cette position et délivre un signal représentatif de la position mesurée vers l'unité 8. Ce signal est ici acquis par l'unité 8 sous forme numérique échantillonné temporellement. Ainsi l'unité 8 acquiert une valeur mesurée du signal pour chaque instant du temps, dit instant t.

[0030] On considère ici que la mesure est réalisée entre des instants initiaux et finaux. Les instants t sont ici séparés deux à deux par un pas de temps τ identique. Ce pas τ est par exemple choisi égal à 100 μ s. Le pas τ est connu sous le terme de « période d'échantillonnage ».

[0031] Par la suite, pour simplifier, les instants t seront exprimés comme des multiples de ce pas de temps. Ainsi, on notera t=1 l'instant initial et t=n l'instant final où n est un entier naturel strictement supérieur à 1. Les instants de mesure seront numérotés continûment de façon chronologique entre ces instants initial et final. On notera « instant t » un instant de mesure quelconque choisi parmi tous les instants de mesure compris entre ces instants initial et final. Cet instant pourra également être noté t=i, où i est un entier appartenant à l'intervalle [0, n].

[0032] La figure 3 représente l'unité 8. L'unité 8 comporte ici :

- un support 40 d'enregistrement d'informations ;
- un calculateur 42 électronique programmable ;
- une interface 44 d'échange de données.

[0033] Le support 40 comporte les instructions et les données nécessaires pour exécuter le procédé de la figure 5. Le calculateur 42 lit et exécute les instructions enregistrées sur le support 40. L'interface 44 permet d'échanger et de transférer des données par exemple en provenance du capteur 6. Dans cet exemple, les expressions « acquise par l'unité 8 » et « acquise par le calculateur 42 » sont équivalentes. L'interface 44 permet aussi de transmettre à un autre appareil les dérivées première et seconde calculées par l'unité 8.

[0034] La figure 4 est un schéma synoptique représentant un exemple de fonctionnement de l'unité 8 pour estimer des dérivées temporelles première D1 et seconde D2 de la grandeur X à l'instant t. Cette estimation est réalisée de manière itérative pour chaque instant t, en fonction notamment de la valeur mesurée de la grandeur X à l'instant t et de données calculées pour l'instant t-1 qui précède immédiatement l'instant t. Sur ce schéma, les blocs portant la référence 50 représentent une intégration numérique, par rapport à la variable temps, de la valeur qui est fournie en entrée dans ce bloc. Les blocs 52 et 54 représentent, respectivement, un comparateur et une sommation. Les flèches représentent le sens de propagation des données. Sur ce schéma, pour simplifier, la boucle est représentée comme pouvant fonctionner en temps continu. Cependant, dans cet exemple, le temps t prend des valeurs discrètes.

[0035] Dans cet exemple, on note :

- $X(t)$ la valeur du signal à dériver mesurée par le capteur 6 pour l'instant t ;
- $D1(t)$ l'estimation de la valeur de la dérivée première de la grandeur X pour l'instant t ;
- $D2(t)$ l'estimation de la valeur de la dérivée seconde de la grandeur X pour l'instant t ;
- $X_{est}(t)$ une estimation de la valeur de la grandeur X à l'instant t, obtenue en intégrant l'estimation $D1(t-1)$ entre les instants t-1 et t ;
- $D1_{est}(t)$ une estimation de l'estimation $D1(t)$ pour l'instant t, obtenue en intégrant l'estimation $D2(t-1)$ entre les instants t-1 et t ;
- $\Delta(t)$ un écart entre les valeurs $X(t)$ et $X_{est}(t)$, calculé de la façon suivante : $\Delta(t) = X(t) - X_{est}(t-1)$.
- $K_1(t)$ et $K_2(t)$ des valeurs de gains à l'instant t dont le rôle sera expliqué plus en détail dans ce qui suit.

[0036] Ici, à chaque instant t, le calculateur 42 estime à la fois les dérivées première et seconde de X(t).

[0037] L'estimation de chaque dérivée comporte ici l'application d'un gain variable sur un écart entre une valeur mesurée de la grandeur X à dériver et une valeur estimée de cette valeur obtenue à partir des dérivées $D1(t-1)$ et $D2(t-1)$.

[0038] La dérivée D2 est estimée en appliquant le gain $K_2(t)$ sur l'écart $\Delta(t)$ au moyen de la formule suivante : $D2(t) = K_2(t-1) * \Delta(t)$. On en déduit l'estimation $D1_{est}(t)$ à

l'aide de la formule suivante : $D1_{est}(t) = D1_{est}(t-1) + \tau * D2(t)$. Le produit $\tau * D2(t)$ correspond à une étape d'intégration numérique de $D2(t)$ entre les instants $t-1$ et t . Ainsi, l'estimation $D1_{est}(t)$ est obtenue à partir de l'intégration de la dérivée $D2$.

[0039] L'estimation de la valeur $D1(t)$ comporte le calcul de la quantité $K_1(t-1) * \Delta(t)$.

- 5 Plus précisément, ici, la dérivée $D1$ est estimée en appliquant le gain K_1 sur l'écart $\Delta(t)$ au moyen de la formule suivante : $D1(t) = D1_{est}(t-1) + K_1(t-1) * \Delta(t)$.

[0040] L'estimation de la valeur $X_{est}(t)$ de X pour l'instant t est réalisée notamment en fonction de la valeur de cette estimation pour l'instant $t-1$ et de la valeur de la dérivée $D1(t-1)$ pour l'instant $t-1$, selon la formule suivante : $X_{est}(t) = X_{est}(t-1) + \tau * D1(t-1)$. Le

- 10 produit $\tau * D1(t-1)$ correspond à une étape d'intégration numérique de la valeur $D1(t-1)$ entre les instants $t-1$ et t . Ainsi, l'estimation de la valeur $X_{est}(t)$ est obtenue à partir de l'intégration de la dérivée $D1$.

[0041] Les gains K_1 et K_2 sont variables, c'est-à-dire que leurs valeurs $K_1(t)$ et $K_2(t)$ sont actualisées à chaque instant t pour obtenir une nouvelle valeur de ces gains à l'instant immédiatement suivant. Ainsi, la valeur $K_1(t)$ est calculée comme suit à

15 chaque instant t : $K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$, où $|X(t)|$ est la valeur absolue de la valeur $X(t)$, $|\Delta(t)|$ est la valeur absolue de l'écart $\Delta(t)$, et L et α des paramètres numériques qui seront détaillés dans ce qui suit.

[0042] La valeur $K_1(t)$ doit rester positive. Ici, si la quantité $K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$ calculée au moyen de la formule précédente est négative, alors on affecte à la valeur $K_1(t)$ une valeur nulle.

[0043] Le gain K_1 présente pour $t=0$ une valeur $K_1(0)$, dite valeur initiale, qui est un paramètre du procédé. La valeur $K_1(0)$ est par exemple choisie égale à zéro.

[0044] Le fait que le terme $\tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$ soit proportionnel à $|X(t)|$ permet d'augmenter la rapidité d'adaptation du gain K_1 et donc l'effet de la contre-réaction lorsque l'amplitude du signal $X(t)$ augmente.

[0045] De même, la valeur $K_2(t)$ est calculée comme suit : $K_2(t) = K_1(t)^2 / (4 * \varepsilon^2)$.

[0046] La valeur $K_2(t)$ est par exemple choisie égale à zéro pour $t=0$.

[0047] Les paramètres α , ε et L sont des paramètres numériques prédéterminés dont les valeurs sont indépendantes des valeurs $X(t)$ mesurées. Typiquement, les valeurs de ces paramètres α , ε et L sont réglées en usine sans connaître la grandeur physique X dont on souhaite calculer la dérivée. Par exemple, les valeurs des paramètres α , ε et L sont pré-enregistrées dans la mémoire 40. Ce réglage d'usine permet déjà à lui seul d'obtenir de très bons résultats. Dès lors dans un mode

30 d'utilisation « simple », l'utilisateur n'a pas besoin de modifier ces valeurs. Toutefois, il est aussi possible de prévoir un mode d'utilisation « expert » dans lequel l'utilisateur peut régler ou modifier lui-même les valeurs de ces paramètres α , ε et L , de préférence préalablement à la mise en œuvre du procédé. Dans ce cas, l'utilisateur

35

peut prendre en compte les informations suivantes pour essayer d'améliorer le réglage par défaut des valeurs de ces paramètres :

- Le paramètre α permet de régler la dynamique d'adaptation du gain K_1 , c'est-à dire la vitesse avec laquelle sa valeur varie en fonction de $X(t)$. Une valeur élevée du paramètre α conduit à une variation rapide de la valeur du gain K_1 en fonction de $X(t)$. Au contraire, une valeur α faible conduit à une variation lente du gain K_1 en fonction de $X(t)$. Le choix de la valeur du paramètre α résulte d'un compromis entre une bonne réactivité du gain K_1 et le souhait d'éviter des oscillations de la valeur de ce gain K_1 . Le paramètre α est ici un nombre réel strictement positif. Notons que le paramètre α permet indirectement de contrôler le gain K_2 , puisque ce dernier est calculé à partir du gain K_1 . Par exemple, pour régler la valeur du paramètre α , on observe la variation de la valeur $K_1(t)$ en réponse à une variation de fréquence et/ou d'amplitude de la valeur $X(t)$ lors du fonctionnement du procédé. Si la variation est trop lente, il faut augmenter la valeur de α . Au contraire, si elle varie trop rapidement, voire présente des oscillations importantes, alors il faut réduire la valeur de α . Par exemple, la variation est dite trop lente s'il s'écoule entre cette variation de fréquence et/ou d'amplitude et la variation de la valeur $K_1(t)$ en réponse un délai supérieur ou égal à cinq fois ou à dix fois le pas τ .

- Le paramètre L permet de régler la sensibilité de l'estimation des dérivées $D1$ et $D2$. Plus la valeur du paramètre L est faible, plus l'estimation des dérivées $D1$ et $D2$ est sensible aux variations de la valeur $X(t)$. Au contraire, plus la valeur du paramètre L est élevée, moins cette estimation est sensible. Cela résulte du terme en $[|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$ dans la formule précédemment définie pour la valeur $K_1(t)$. Le terme en « $L * K_1(t-1)$ » compense l'évolution de l'écart $\Delta(t)$ en fonction de la valeur $X(t)$, ce qui permet d'obtenir une contre-réaction sur l'évolution du gain $K_1(t)$. Là encore, le choix d'une valeur du paramètre L résulte d'un compromis entre des exigences opposées. Une valeur du paramètre L élevée permet de réduire le bruit et d'éviter l'apparition d'oscillations temporelles indésirables sur les dérivées $D1$ et $D2$. En revanche, une valeur trop élevée du paramètre L peut conduire à l'apparition d'un retard temporel entre la grandeur $X(t)$ et son estimation $X_{est}(t)$. La valeur du paramètre L peut avantageusement être ajustée empiriquement par un utilisateur au cours de l'exécution du procédé en observant l'évolution des valeurs des dérivées $D1$ et $D2$ calculées. Par exemple, si les valeurs de $D1(t)$ oscillent de façon trop importante lors du fonctionnement du procédé et que du bruit est trop amplifié, alors il faut augmenter la valeur de L . Au contraire, si un retard trop important apparaît entre la grandeur $X(t)$ et son estimation $X_{est}(t)$, alors il faut diminuer la valeur de L . Par exemple, la valeur du paramètre L est typiquement comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} .

- Le paramètre ε permet de régler la précision de l'estimation de la dérivée $D1$ par rapport à celle de la dérivée $D2$. Il correspond ici à l'amortissement de la fonction de transfert de $X(t)/X_{est}(t)$. Une valeur du paramètre ε élevée conduit à une bonne

précision de l'estimation de la dérivée D1, mais au détriment de la précision de l'estimation de la dérivée D2. Une valeur du paramètre ε faible (c'est-à-dire proche de 0) produit l'effet contraire. Le choix de la valeur de ε résulte donc d'un compromis entre ces deux exigences. La valeur du paramètre ε doit cependant être strictement

5 positive. Ici, la valeur du paramètre ε est typiquement choisie entre 0,4 et 1 et, de préférence, entre 0,6 et 0,8.

[0048] Un exemple de mise en œuvre du procédé pour acquérir automatiquement les dérivées première et seconde va maintenant être décrit en référence à l'organigramme de la figure 5 et à l'aide des figures 1 à 4. Ce procédé est décrit pour

10 un instant t. Dans cet exemple, l'estimation de D1 et D2 est réalisée en temps réel au fur et à mesure que le signal X(t) est mesuré et acquis pour chaque instant. Ainsi, à l'instant t où l'estimation de D1 et D2 est réalisée, les valeurs X(t+1), D1(t+1) et D2(t+1) sont inconnues. En d'autres termes, l'estimation de D1 et D2 est uniquement réalisée à partir des valeurs passées.

15 [0049] Le procédé débute par une étape 100 d'initialisation. Par exemple, les valeurs $K_1(0)$, $K_2(0)$, $X_{est}(0)$, $\Delta(0)$, $D1(0)$ et $D1_{est}(0)$ sont préalablement initialisées avec des valeurs d'initialisation prédéfinies. Pour simplifier, on fixe ici ces valeurs d'initialisation toutes égales à zéro. Les valeurs des paramètres α , L et ε sont ici acquises automatiquement par l'unité 8. Ici, on a choisi les valeurs suivantes : $\alpha = 7000$, $\varepsilon = 0,7$

20 et $L = 2 \cdot 10^{-4}$.

[0050] Ensuite, lors d'une étape 102, les estimations des dérivées D1 et D2 sont réalisées pour l'instant initial $t=1$.

[0051] A cet effet, lors d'une opération 104, la valeur X(1) est mesurée par le capteur 6 puis acquise par l'unité 8.

25 [0052] Puis, lors d'une opération 106, on calcule automatiquement l'écart $\Delta(1)$ à partir des valeurs $X_{est}(0)$ et X(1) au moyen de la formule suivante : $\Delta(1) = X(1) - X_{est}(0)$. Ici, $\Delta(1)$ est égal à la valeur X(1) puisque la valeur $X_{est}(0)$ est nulle. On estime ensuite automatiquement la valeur D2(1) à l'aide de la formule $D2(1) = K_2(0) \cdot \Delta(1)$ et la valeur D1(1) à l'aide de la formule $D1(1) = D1_{est}(0) + K_1(0) \cdot \Delta(1)$. Lors de cette étape

30 106, l'unité 8 commande le vérin 12 en fonction de l'estimation la plus récente de D1(t) ou D2(t). Par exemple, l'unité 8 génère le signal de commande de la centrale 26 en fonction de la loi de commande prédéfinie et des estimations les plus récentes de D1(t) et D2(t) et, si nécessaire, de la position X(t) mesurée.

[0053] Enfin, lors d'une opération 108, on met à jour les valeurs X_{est} et $D1_{est}$ ainsi que

35 les valeurs des gains K_1 et K_2 pour obtenir leur nouvelle valeur à l'instant $t=1$ qui sera utilisée lors de la prochaine exécution de l'opération 106. Pour cela, le calculateur 42 exécute successivement les calculs suivants :

$$- D1_{est}(1) = D1_{est}(0) + \tau \cdot D2(1) ;$$

$$- X_{est}(1) = X_{est}(0) + \tau \cdot D1(1) ;$$

$-K_1(1) = K_1(0) + \tau * |X(1)| * \alpha * [|\Delta(1)| - L * K_1(0)]$ si $K_1(0) + \tau * |X(1)| * \alpha * [|\Delta(1)| - L * K_1(0)]$ est strictement positif et $K_1(1) = 0$ sinon ;

$- K_2(1) = K_1(1)^2 / (4 * \varepsilon^2)$.

[0054] Puis, le calculateur 42 retourne au début de l'étape 102 pour exécuter à nouveau les opérations 104 à 108. Cette nouvelle exécution des opérations 104 à 108 est identique à la précédente, sauf qu'on se place à l'instant suivant $t=2$ au lieu de l'instant $t=1$. Ainsi, lors de l'exécution suivante des opérations 104 à 108, l'écart pris en compte est l'écart $\Delta(2) = X(2) - X_{est}(1)$. Les opérations 104 à 108 sont ainsi répétées de proche en proche pour chacun des instants t successifs qui suivent l'instant $t=1$ et jusqu'à l'instant final $t=n$. Le calculateur 42 obtient ainsi les valeurs $D1(t)$ et $D2(t)$ pour chacun des instants t .

[0055] La mise à jour des valeurs des gains K_1 et K_2 pour chaque instant t , en fonction notamment de la valeur $X(t)$ et de l'écart $\Delta(t)$ à cet instant permet une prise en compte d'éventuelles variations de la fréquence temporelle du signal pour l'estimation de sa dérivée. On peut ainsi estimer la dérivée d'un signal donné sans forcément connaître au préalable ses propriétés fréquentielles. La facilité d'utilisation et la fiabilité du procédé d'estimation sont ainsi améliorées.

[0056] De plus, les calculs contiennent des formules qui suivent une dépendance linéaire en fonction de la valeur $X(t)$, au contraire des algorithmes connus dans lesquels la dépendance en $X(t)$ suit le plus souvent une loi de puissance non entière. Le procédé décrit ici met donc en œuvre moins d'opérations de calcul que dans les algorithmes connus. Sa complexité algorithmique est ainsi réduite. Le procédé peut donc être mis en œuvre plus facilement sur des systèmes en temps réel car il est plus rapide.

[0057] Le procédé de différentiation est ainsi amélioré par rapport aux procédés connus de différentiation à modes glissants, tout en conservant les avantages de ces derniers par rapport aux procédés de différentiation algébrique.

[0058] Les figures 6 à 9B illustrent l'avantage procuré par ce procédé par rapport à des procédés connus. Ces données sont issues de simulations numériques.

[0059] La figure 6 représente un exemple d'évolution de la valeur $X(T)$ de la grandeur X en fonction du temps T . Dans ce qui suit, on parlera de « signal $X(T)$ » pour la désigner. Le temps est ici continu et est noté « T » pour le distinguer des instants « t » discrets précédemment utilisés. Pour simplifier, la valeur du signal $X(T)$, en ordonnée, est exprimée en unités arbitraires.

[0060] Dans cet exemple, la valeur $X(T)$ est un signal sinusoïdal de forme $\sin(2 * \pi * F_0 * T)$ de fréquence F_0 . Pour cet exemple, le signal $X(T)$ a une durée de huit secondes. Ce signal représente la valeur mesurée de la grandeur physique qu'on cherche à dériver. La valeur théorique de la dérivée première de ce signal $X(T)$ est donnée par la formule : $D1_{th}(T) = 2 * \pi * F_0 * \cos(2 * \pi * F_0 * T)$. De même, la valeur

théorique de la dérivée seconde de ce signal $X(T)$ est donnée par la formule : $D2_{th}(T) = -4\pi^2 F0^2 \sin(2\pi F0 T)$.

[0061] Ici, la fréquence $F0$ change de valeur au cours du temps. Elle prend successivement les valeurs suivantes :

- 5 - 2Hz pour T appartenant à l'intervalle $[0s ; 2s]$;
- 3Hz pour T appartenant à l'intervalle $[2s ; 4s]$;
- 1Hz pour T appartenant à l'intervalle $[4s ; 6s]$;
- 2Hz pour T appartenant à l'intervalle $[6s ; 8s]$.

[0062] Ce signal $X(T)$ est préalablement filtré numériquement avant d'être dérivé, de
 10 manière à limiter le niveau de bruit. Le même filtrage est appliqué au signal $X(T)$ pour
 chacun des exemples qui seront exposés dans ce qui suit afin de ne pas fausser la
 comparaison entre les résultats issus des différentes méthodes de dérivation. Ce
 filtrage comporte l'application d'un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 5, avec une
 fréquence de coupure égale à 1kHz. Un bruit blanc est ici rajouté sur le signal $X(T)$
 15 avant le filtrage, afin de comparer la robustesse des différentes méthodes vis à vis de
 ce bruit.

[0063] Les figures 7A et 7B représentent respectivement l'évolution, en fonction du
 temps T , des dérivées première $D1_c$ et seconde $D2_c$ du signal $X(T)$, calculées au
 moyen d'un algorithme de différentiation connu. Pour simplifier, la valeur des dérivées
 20 $D1_c$ et $D2_c$, en ordonnée, est exprimée en unités arbitraires.

[0064] Par exemple, cet algorithme connu est l'algorithme de dérivation numérique
 dit par différence arrière trois points. La dérivée $D1'$ d'un signal X échantillonné est
 calculée comme suit : $D1'(t) = [3X(t) - 4X(t-1) + X(t-2)]/(2\tau)$.

[0065] Cet algorithme est par exemple décrit dans le document suivant : Y.
 25 Takahashi, M.J. Rabins et D.M. Auslander, « Control and Dynamic Systems »,
 Addison Wesley Publishing Company, 1972. Le pas d'échantillonnage τ est ici choisi
 égal à 100 μ s.

[0066] On constate que la dérivée $D1_c$ (figure 7A) présente un bruit important
 quelque soit la fréquence $F0$ du signal $X(T)$. La dérivée $D2_c$ (figure 7B) présente un
 30 de bruit très élevé, à tel point qu'on ne discerne même pas la forme de la dérivée
 $D2_c$, ce qui la rend inexploitable. Un tel algorithme n'est donc pas satisfaisant pour
 acquérir les dérivées $D1_c$ et $D2_c$ du signal $X(t)$.

[0067] Les figures 8A et 8B représentent respectivement l'évolution, en fonction du
 temps T , des dérivées première $D1_{DAO}$ et seconde $D2_{DAO}$ du signal $X(T)$, calculé au
 35 moyen d'un autre algorithme de différentiation connu. En l'occurrence, il s'agit de
 l'algorithme « Différentiation Adaptative d'ordre 2 » (DAO2) tel que décrit dans la
 thèse de doctorat de L. Sidhom précédemment citée, « Sur les différentiateurs en
 temps réel : algorithmes et applications », 2011, INSA Lyon, France, accessible à
 l'adresse internet suivante : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701576>, et
 40 notamment à la section 1.4 de ce document. Les paramètres de cet algorithme sont

choisis comme suit : λ_0 est initialisé à 20, λ_1 est initialisé à 20, λ_2 est initialisé à 0, $K_0=80$ et $K_1=20$. Pour simplifier, la valeur des dérivées $D1_{DAO}$ et $D2_{DAO}$, en ordonnée, est exprimée en unités arbitraires sur les figures 8A et 8B.

[0068] On constate que la dérivée $D1_{DAO}$ (figure 8A) ne présente pas d'écart notable par rapport à la valeur théorique $D1_{th}$. Cependant, elle présente un bruit qui augmente au cours du temps et qui devient important à partir de l'instant $T=4s$. La dérivée $D2_{DAO}$ (figure 8B) présente également un bruit, d'amplitude beaucoup plus importante, à partir de ce même instant $T=4s$. On observe en outre un décalage temporel entre la dérivée calculée $D2_{DAO}$ (courbe 120) et la dérivée théorique (courbe 122) donnée par la formule $D2_{th}(T) = -4*\pi^2*F0^2*\sin(2*\pi*F0*T)$.

[0069] Les figures 9A et 9B représentent respectivement l'évolution, en fonction du temps T , des dérivées première et seconde du signal $X(T)$, calculé au moyen du procédé de la figure 5 tel que décrit précédemment, sauf que les valeurs des paramètres suivants sont choisies : $\alpha = 7000$, $\varepsilon = 0,7$, $L = 2*10^{-4}$, $\tau = 100\mu s$, K_1 initialisé à 70. Pour simplifier, la valeur des dérivées $D1$ et $D2$, en ordonnée, est exprimée en unités arbitraires sur les figures 9A et 9B.

[0070] On observe que la dérivée $D1$ estimée (figure 9A) ne présente pas d'écart notable par rapport à la valeur théorique $D1_{th}$. Le bruit est faible voire inexistant.

[0071] De même, la dérivée $D2$, ne présente pas d'écart notable par rapport à la valeur théorique $D2_{th}$, si ce n'est pour les instants $T=2s$, $T=4s$ et $T=6s$ pour lesquels on observe un pic, causé par le changement de la fréquence $F0$. Ce pic vient du fait que le signal $X(T)$ et la dérivée $D1$, bien que continus, ne sont pas dérivables en ces instants et présentent ainsi des points singuliers du fait du changement brusque de valeur de $F0$. La présence de ces pics en ces points singuliers est cependant une propriété satisfaisante du procédé, car cela indique que le procédé peut d'affranchir de ces points singuliers sans que la qualité de l'estimation ne soit dégradée pour les autres instants T .

[0072] On observe également que le niveau de bruit de $D2$ reste faible, quelle que soit la valeur de la fréquence $F0$. Ainsi, la dérivation est de meilleure qualité.

[0073] Les figures 10A et 10B représentent respectivement l'évolution des gains λ_0 et λ_1 utilisés dans l'algorithme DAO2 précédemment décrit en fonction du temps. La valeur de ces gains, en ordonnée, est exprimée en unités arbitraires. Ces gains λ_0 et λ_1 jouent dans l'algorithme DAO2 un rôle analogue aux gains K_1 et K_2 du procédé de la figure 5.

[0074] On constate que, dans l'algorithme DAO2, l'adaptation des gains λ_0 et λ_1 à la fréquence du signal $X(T)$ n'est pas satisfaisante. En effet, ces gains λ_0 et λ_1 devraient voir leur valeur augmenter lorsque la fréquence $F0$ augmente, et diminuer lorsque la fréquence $F0$ diminue. Au contraire, on constate que les gains λ_0 et λ_1 restent essentiellement constants à partir de l'instant $T=4s$, alors que la fréquence du signal $X(T)$ passe de 3Hz à 1Hz à cet instant là. Il en résulte une mauvaise adaptation au

signal $X(T)$. C'est ce qui explique la mauvaise qualité et le niveau de bruit important pour les estimations calculées des valeurs de $D1$ et surtout $D2$, notamment à partir de l'instant $T=4s$, comme on peut le voir sur les figures 8A et 8B.

[0075] Les figures 11A et 11B représentent respectivement l'évolution des gains K_1 et K_2 utilisés dans le procédé de la figure 5 précédemment décrit. Au contraire des gains λ_0 et λ_1 , les gains K_1 et K_2 présentent une adaptation au signal $X(T)$ qui est satisfaisante. Par exemple, le gain K_1 augmente aux instants $T=2s$ et $T=6s$ en réponse à l'augmentation la fréquence $F0$ et diminue à l'instant $T=4s$ en réponse à la diminution de la fréquence $F0$ à cet instant. Il en va de même pour le gain K_2 .

[0076] Le procédé de la figure 5 est donc plus satisfaisant pour acquérir les dérivées $D1$ et $D2$ du signal $X(T)$ que ne le sont les méthodes selon l'état de la technique. L'adaptation des gains K_1 et K_2 par rapport au signal $X(T)$ est en effet meilleure que celle des procédés connus et notamment de l'algorithme DAO2.

[0077] De nombreux autres modes de réalisation sont possibles.

[0078] L'ensemble 2 peut être différent. En particulier, il n'est pas limité au système 10. Par exemple, l'objet 4 de l'ensemble 2 est un véhicule routier ou ferroviaire, ou un aéronef. Dans ce cas, le repère de l'espace peut être défini différemment.

[0079] La grandeur X peut représenter autre chose qu'une position. Par exemple, la grandeur X mesurée par le capteur 6 est une pression d'un fluide en circulation dans une conduite. L'ensemble 2 est alors utilisé pour calculer un débit de ce fluide, à partir de la pression mesurée. On peut ainsi acquérir le débit sans avoir recours à un débitmètre qui est un composant typiquement plus coûteux qu'un capteur de pression. Le capteur 6 est alors configuré différemment. La grandeur X peut aussi être l'intensité d'un courant électrique. Dans ce dernier cas, la dérivée temporelle de l'intensité du courant électrique est généralement utilisée pour calculer une tension électrique sans, par exemple, utiliser de voltmètre.

[0080] L'ensemble 2 peut également être utilisé comme dérivateur dans un régulateur de type PID (« PID control »).

[0081] Le capteur 6 peut être différent et doit être adapté à la grandeur physique à mesurer.

[0082] L'unité 8 peut être différente. Par exemple, le signal X mesuré est un signal analogique et non pas un signal numérique échantillonné. Le calculateur 42 est alors réalisé différemment. Par exemple, il comporte un amplificateur analogique. De même, l'intégration numérique qui intervient dans le calcul des valeurs $D1_{est}(t)$ et $X_{est}(t)$ peut être remplacée par une intégration au moyen d'un intégrateur analogique. Par exemple, le calculateur 42 peut être un calculateur analogique et non pas numérique.

[0083] Le système 10 peut être différemment. Par exemple, il s'agit d'une presse à injection hydraulique.

[0084] Ce qui a été décrit dans le cas particulier du système 10 et du vérin 12, s'applique à tout dispositif matériel qui doit être commandé en fonction de l'estimation de la dérivée première d'une grandeur physique. Ainsi, le dispositif matériel commandé n'est pas nécessairement un vérin. Il peut s'agir de tout type d'actionneur
5 électronique ou mécanique commandable. Il peut aussi s'agir d'un écran qui affiche des données techniques sur l'état d'un système matériel.

[0085] Le signal $X(t)$ peut être acquis différemment. Par exemple, toutes les valeurs de $X(t)$ pour chacun des instants t sont mesurées et acquises préalablement aux opérations d'estimation de la dérivée pour l'instant $t=1$ et donc avant l'étape 102. Le
10 procédé n'est alors pas réalisé en temps réel.

[0086] Le calcul de la dérivée $D2$ peut être omis, de sorte qu'on n'estime que la dérivée première du signal $X(t)$. La figure 12 illustre un schéma synoptique représentant un exemple 120 de fonctionnement de l'unité 8 dans ce cas, pour estimer cette seule dérivée $D1$. Le gain $K_2(t)$ n'est alors pas utilisé, de même que le
15 paramètre ε . De plus, pour simplifier, dans ce cas $D1_{est}(t)$ peut être considéré comme une constante nulle. La dérivée $D1$ est donc estimée au moyen de la formule suivante : $D1(t) = K_1(t-1) \cdot \Delta(t)$. Les étapes 100 à 108 du procédé sont alors modifiées en conséquence.

[0087] Les valeurs des paramètres α , ε et L peuvent être choisies différemment. Par
20 exemple, les valeurs de ces paramètres ne sont pas des constantes et varient au cours du temps en fonction, par exemple, des mesures d'un autre capteur différent du capteur 6. Il en va de même pour les valeurs d'initialisation des gains K_1 et K_2 .

[0088] Le pas de temps τ peut être différent. Il peut ne pas être constant. Par exemple, il est modifié en temps réel pour s'adapter à la fréquence d'arrivée des
25 données lors de l'échantillonnage ou de la mesure du signal $X(t)$. Les instants t ne sont alors plus espacés régulièrement mais correspondent chacun à l'arrivée de données. Un tel cas de figure se rencontre notamment lorsque le signal $X(t)$ est échantillonné spatialement. Par exemple, le signal $X(t)$ est mesuré à l'aide d'un capteur 6 tel qu'un codeur rotatif qui présente une périodicité spatiale. Dans un
30 exemple, des données sont fournies par ce codeur à chaque fois qu'une roue de ce codeur effectue un tour complet. Autrement dit, à chaque instant t correspond un tour de roue complet de ce codeur.

[0089] Dans le cas où le pas τ est variable, alors, dans les formules précédemment décrites, le pas constant τ est remplacé par un pas variable $\tau(t)$ qui dépend du
35 temps. A chaque instant t , lors de l'opération 104, on détermine la valeur de $\tau(t)$, c'est-à-dire la durée qui sépare les instants t et $t-1$. Par exemple, on mesure la durée qui s'est écoulée depuis la dernière fois que le capteur 6 a fourni des données. Puis on utilise cette valeur de $\tau(t)$ dans les calculs qui suivent, notamment lors de l'opération 106 et 108.

[0090] Lors de l'étape 100, l'initialisation des valeurs $\Delta(0)$ et $D1(0)$ peut être omise si ces valeurs ne sont pas utilisées par la suite du procédé.

[0091] L'ordre des opérations 106 et 108 peut être modifié. Par exemple, pour chaque instant t , après avoir calculé l'écart $\Delta(t)$, on met à jour la valeur des gains K_1 et K_2 avant d'estimer les dérivées $D1(t)$ et $D2(t)$. Ces dernières sont alors estimées pour cet instant t à partir de ces valeurs des gains K_1 et K_2 mises à jour. Dans ce cas, le calculateur 42 exécute successivement les calculs suivants :

$$- D1_{est}(t) = D1_{est}(t-1) + \tau * D2(t-1) ;$$

$$- X_{est}(t) = X_{est}(t-1) + \tau * D1(t-1) ;$$

$$10 \quad - K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)] \text{ si } K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)] \text{ est strictement positif et } K_1(t) = 0 \text{ sinon ;}$$

$$- K_2(t) = K_1(t)^2 / (4 * \varepsilon^2) ;$$

$$- D2(t) = K_2(t) * \Delta(t) ;$$

$$- D1(t) = D1_{est}(t) + K_1(t) * \Delta(t).$$

15 [0092] Dans ce cas, lors de l'étape 100, les valeurs d'initialisation peuvent être choisies différemment. En particulier, on choisit $X_{est}(t) = X(0)$; $D1(0) = 0$ et $D2(0) = 0$.

[0093] Avantagusement, on peut choisir une valeur minimale K_{1_min} pour $K_1(t)$ qui est strictement positive. Par exemple, la valeur minimale est égale à 10% de la valeur $K_1(0)$, si celle-ci est non nulle. Alors, lors de l'opération 108, si la quantité $K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$ calculée au moyen de la formule précédente est strictement inférieure à cette valeur minimale K_{1_min} , alors on affecte à la valeur $K_1(t)$ cette valeur minimale K_{1_min} et non plus une valeur nulle.

[0094] La valeur $D1(t)$ peut être calculée à l'instant t à partir de valeurs du gain K_1 plus anciennes, par exemple de l'instant $t-2$, dans le cas où ce gain K_1 varie peu au cours du temps. Il en va de même pour la valeur $D2(t)$ pour le gain K_2 .

[0095] L'ensemble 2 peut être utilisé pour estimer des dérivées d'ordre quelconque, en combinant plusieurs exemplaires de l'ensemble 2. Par exemple, pour estimer la dérivée à l'ordre trois d'un signal $X(t)$, on estime les dérivées $D1$ et $D2$ du signal $X(t)$ au moyen de l'ensemble 2. Conjointement, le même procédé est utilisé en prenant comme signal d'entrée la valeur $D2(t)$ ainsi estimée, ce qui permet d'estimer la dérivée première de $D2(t)$, et donc la dérivée d'ordre trois du signal $X(t)$. On peut alternativement utiliser conjointement le procédé suivant l'exemple 120 pour estimer la dérivée première de $D2(t)$, et donc la dérivée d'ordre trois du signal $X(t)$.

[0096] En variante, le procédé est utilisable pour dériver une grandeur qui n'est pas une grandeur physique. Ainsi, l'étape 104 ainsi que le capteur 6 sont omis. Par exemple, la grandeur à dériver est un cours boursier d'une valeur mobilière.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'acquisition de la dérivée temporelle d'une grandeur physique, ce procédé comportant :

- 5 a) la mesure (104), par un capteur électronique, de la valeur de la grandeur physique ;
 - b) l'acquisition, par un calculateur électronique, de la valeur mesurée par ledit capteur, notée $X(t)$, pour chaque instant t du temps ;
 - c) le calcul (102, 110) d'une estimation, notée $D1(t)$, de la dérivée première de la grandeur physique à l'instant t , ce calcul étant réalisé à partir d'un écart $\Delta(t)$ entre :
 - la valeur $X(t)$ de la grandeur physique mesurée à l'instant t , et
 - une estimation $X_{est}(t)$ de cette valeur à cet instant t , obtenue en intégrant l'estimation, notée $D1(t-1)$, de la dérivée de cette grandeur physique calculée pour un instant $t-1$ qui précède immédiatement l'instant t , cette intégration étant
 - 15 réalisée entre les instants $t-1$ et t ,
- caractérisé en ce que, pour chaque instant t , l'étape c) comporte :
- l'estimation de la dérivée première à l'aide de la relation suivante : $D1(t) = D1_{est} + K_1 * \Delta(t)$, où :

- K_1 est un premier gain défini au moyen de la formule suivante :
- 20 $K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)]$, où :
 - $|X(t)|$ est la valeur absolue de la valeur $X(t)$,
 - $|\Delta(t)|$ est la valeur absolue de l'écart $\Delta(t)$,
 - τ , α et L sont des paramètres numériques prédéterminés dont les valeurs sont indépendantes des valeurs $X(t)$ mesurées de la grandeur physique,
- 25 - $D1_{est}$ est une première estimation de l'estimation $D1(t)$ qui prend :
 - soit une valeur $D1_{est}(t)$ calculée à l'instant t , K_1 ayant alors la valeur $K_1(t)$ calculée à l'instant t ,
 - soit une valeur $D1_{est}(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$, K_1 ayant alors la valeur
 - 30 $K_1(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$, et
- la mise à jour de la valeur, notée $K_1(t)$, du premier gain K_1 pour cet instant t .

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la dérivée première est estimée à l'aide de la relation suivante : $D1(t) = D1_{est}(t-1) + K_1(t-1) * \Delta(t)$, la valeur du gain $K_1(t)$ mise à jour étant alors destinée à être utilisée lors de l'itération suivante de l'étape c).

35

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la dérivée première est estimée à l'aide de la relation suivante : $D1(t) = D1_{est}(t) + K_1(t) \cdot \Delta(t)$, la valeur du gain $K_1(t)$ étant celle mise à jour lors de cette itération de l'étape c).
- 5 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel τ est un paramètre numérique prédéterminé dont la valeur est constante au cours du temps.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le
 - 10 procédé comporte pour chaque instant t :
 - la mise à jour de la valeur d'un second gain $K_2(t)$ pour obtenir sa nouvelle valeur à l'instant t , notée $K_2(t)$, cette mise à jour étant réalisée en fonction de l'écart $\Delta(t)$, et
 - l'estimation de la dérivée seconde, notée $D2(t)$, de la grandeur physique pour l'instant t , à l'aide de la formule suivante : $D2(t) = K_2 \cdot \Delta(t)$, où le gain K_2 prend la valeur
 - 15 $K_2(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$ ou la valeur $K_2(t)$ calculée à l'instant t .
 6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel ladite mise à jour est effectuée au moyen de la formule suivante : $K_2(t) = K_1^2(t)/(4 \cdot \varepsilon^2)$, où ε est un paramètre numérique prédéterminé dont la valeur est indépendante des valeurs $X(t)$ mesurées de la
 - 20 grandeur physique.
 7. Procédé selon la revendication 5 ou 6, dans lequel le procédé comporte l'obtention de la valeur $D_{est}(t)$ en intégrant l'estimation $D2(t)$ de la dérivée seconde.
 - 25 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel D_{est} est un paramètre numérique dont la valeur est constante au cours du temps.
 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la grandeur physique est une position d'un objet mobile (4) dans un repère (R) de
 - 30 l'espace.
 10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, lors de la mise à jour de la valeur $K_1(t)$ effectuée lors de l'étape c) pour l'itération suivante, la valeur $K_1(t)$ est choisie égale à zéro si la quantité :
 - 35 $K_1(t-1) + \tau \cdot |X(t)| \cdot \alpha \cdot [|\Delta(t)| - L \cdot K_1(t-1)]$ calculée présente une valeur négative.
 11. Procédé de commande d'un dispositif matériel en fonction de la dérivée temporelle d'une grandeur physique, ce procédé comportant :

- a) la mesure (104), par un capteur électronique, de la valeur de la grandeur physique ;
- b) l'acquisition, par un calculateur électronique, de la valeur mesurée par ledit capteur, notée $X(t)$, pour chaque instant t du temps ;
- 5 c) le calcul (102, 110) d'une estimation, notée $D1(t)$, de la dérivée première de la grandeur physique à l'instant t , ce calcul étant réalisé à partir d'un écart $\Delta(t)$ entre :
- la valeur $X(t)$ de la grandeur physique mesurée à l'instant t , et
 - une estimation $X_{est}(t)$ de cette valeur à cet instant t , obtenue en intégrant l'estimation, notée $D1(t-1)$, de la dérivée de cette grandeur physique calculée pour un
- 10 instant $t-1$ qui précède immédiatement l'instant t , cette intégration étant réalisée entre les instants $t-1$ et t ,
- d) la commande (106), par le calculateur électronique, du dispositif matériel commandable en fonction de l'estimation de la dérivée première calculée lors de l'étape c),
- 15 caractérisé en ce que, pour chaque instant t , l'étape c) comporte :
- l'estimation de la dérivée première à l'aide de la relation suivante : $D1(t) = D1_{est} + K_1 * \Delta(t)$, où :
- K_1 est un premier gain défini au moyen de la formule suivante :
- $$K_1(t) = K_1(t-1) + \tau * |X(t)| * \alpha * [|\Delta(t)| - L * K_1(t-1)], \text{ où :}$$
- 20
- $|X(t)|$ est la valeur absolue de la valeur $X(t)$,
 - $|\Delta(t)|$ est la valeur absolue de l'écart $\Delta(t)$,
 - τ , α et L sont des paramètres numériques prédéterminés dont les valeurs sont indépendantes des valeurs $X(t)$ mesurées de la grandeur physique,
- 25
- $D1_{est}(t)$ est une première estimation de l'estimation $D1(t)$ qui prend :
- soit une valeur $D1_{est}(t)$ calculée à l'instant t , K_1 ayant alors la valeur $K_1(t)$ calculée à l'instant t ,
 - soit une valeur $D1_{est}(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$, K_1 ayant alors la valeur $K_1(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$,
- 30 - la mise à jour de la valeur, notée $K_1(t)$, du premier gain K_1 pour cet instant t .

12. Support d'enregistrement d'informations (40), 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

35 calculateur électronique.

13. Calculateur électronique (42) pour la mise en œuvre d'un procédé conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 11, ce calculateur étant programmé pour :

- acquérir une valeur d'une grandeur physique mesurée par un capteur, notée $X(t)$, pour chaque instant t du temps ;
- calculer une estimation, notée $D1(t)$, de la dérivée première de la grandeur physique à l'instant t , ce calcul étant réalisé à partir d'un écart $\Delta(t)$ entre :

- 5 - la valeur $X(t)$ de la grandeur physique mesurée à l'instant t , et
- une estimation $X_{est}(t)$ de cette valeur à cet instant t , obtenue en intégrant l'estimation, notée $D1(t-1)$, de la dérivée de cette grandeur physique calculée pour un instant $t-1$ qui précède immédiatement l'instant t , cette intégration étant réalisée entre les instants $t-1$ et t ,

10 caractérisé en ce que, pour chaque instant t , ledit calcul comporte :

- l'estimation de la dérivée première à l'aide de la relation suivante : $D1(t) = D1_{est} + K_1 \cdot \Delta(t)$, où :

- K_1 est un premier gain défini au moyen de la formule suivante :

$$K_1(t) = K_1(t-1) + \tau \cdot |X(t)| \cdot \alpha \cdot [|\Delta(t)| - L \cdot K_1(t-1)], \text{ où :}$$

- 15 • $|X(t)|$ est la valeur absolue de la valeur $X(t)$,
- $|\Delta(t)|$ est la valeur absolue de l'écart $\Delta(t)$,
- τ , α et L sont des paramètres numériques prédéterminés dont les valeurs sont indépendantes des valeurs $X(t)$ mesurées de la grandeur physique,
- 20 - $D1_{est}$ est une première estimation de l'estimation $D1(t)$ qui prend :
 - soit une valeur $D1_{est}(t)$ calculée à l'instant t , K_1 ayant alors la valeur $K_1(t)$ calculée à l'instant t ,
 - soit une valeur $D1_{est}(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$, K_1 ayant alors la valeur $K_1(t-1)$ calculée à l'instant $t-1$,
- 25 - la mise à jour de la valeur, notée $K_1(t)$, du premier gain K_1 pour cet instant t .

14. Ensemble (2) pour mesurer automatiquement la vitesse de déplacement d'un objet mobile (4) par rapport à un repère (R) de l'espace, cet ensemble comportant :

- ledit objet mobile (4),
- 30 - un capteur électronique (6), apte à acquérir la valeur d'une grandeur physique représentative de la position dudit objet par rapport au repère de l'espace, cet ensemble étant caractérisé en ce qu'il comporte un calculateur électronique (42) conforme à la revendication 13 pour acquérir automatiquement la dérivée première de la grandeur physique (X) représentative de la position de l'objet, cette dérivée
- 35 première correspondant à la vitesse de déplacement de cet objet mobile par rapport audit repère.

1/6

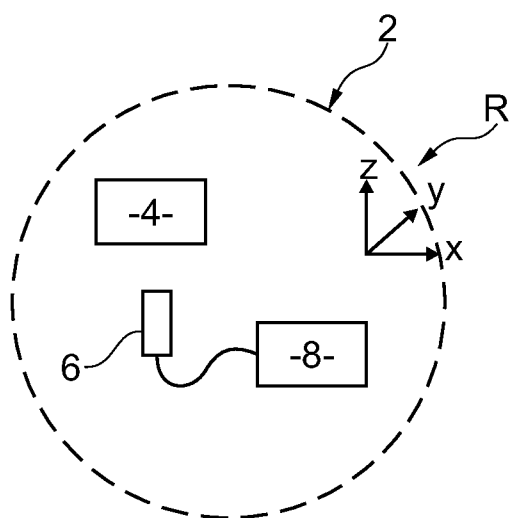


Fig. 1

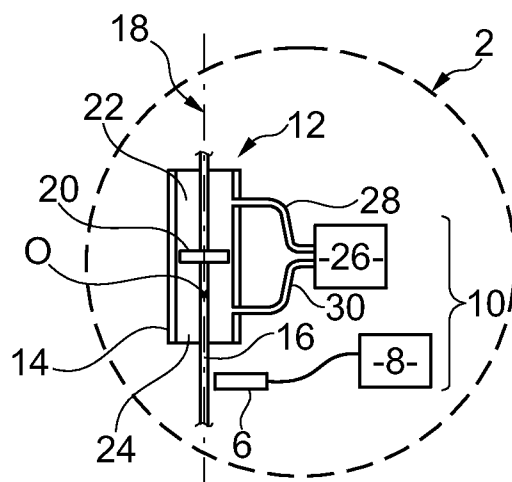


Fig. 2

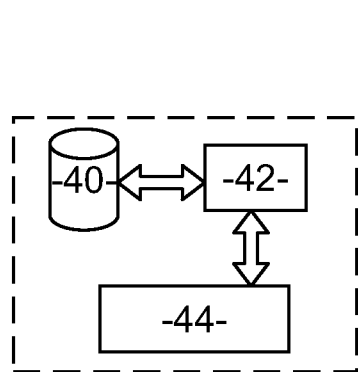


Fig. 3

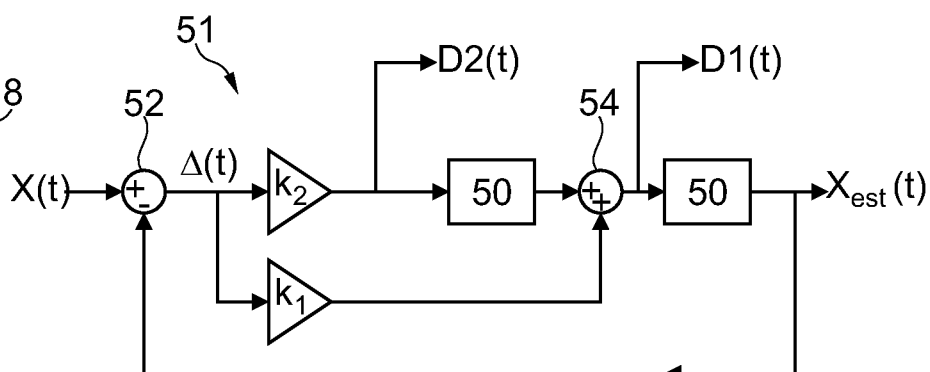


Fig. 4

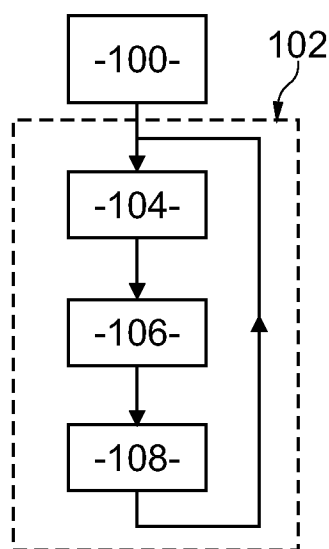


Fig. 5

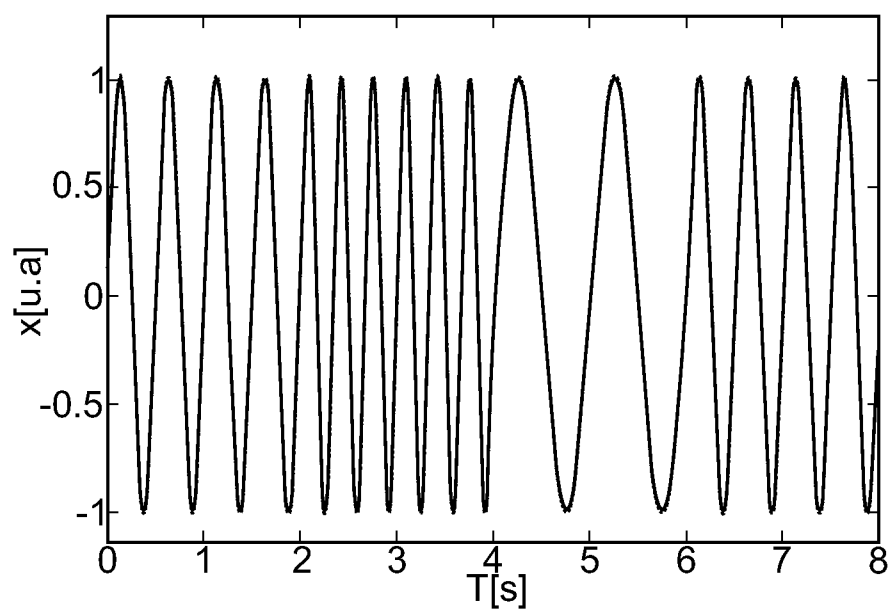


Fig. 6

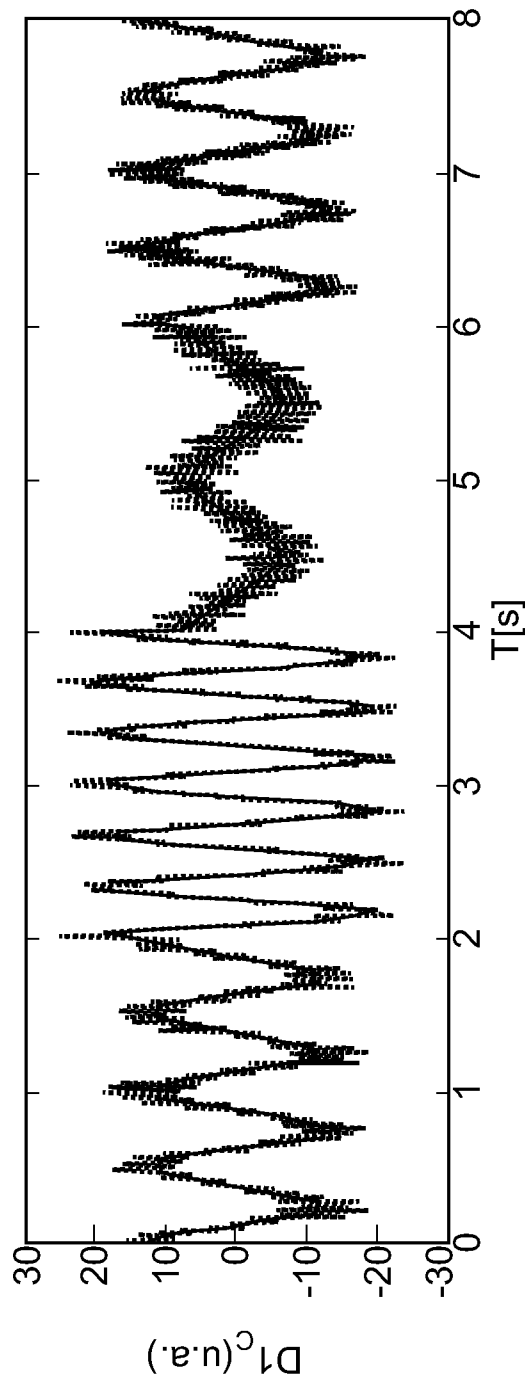


Fig. 7A

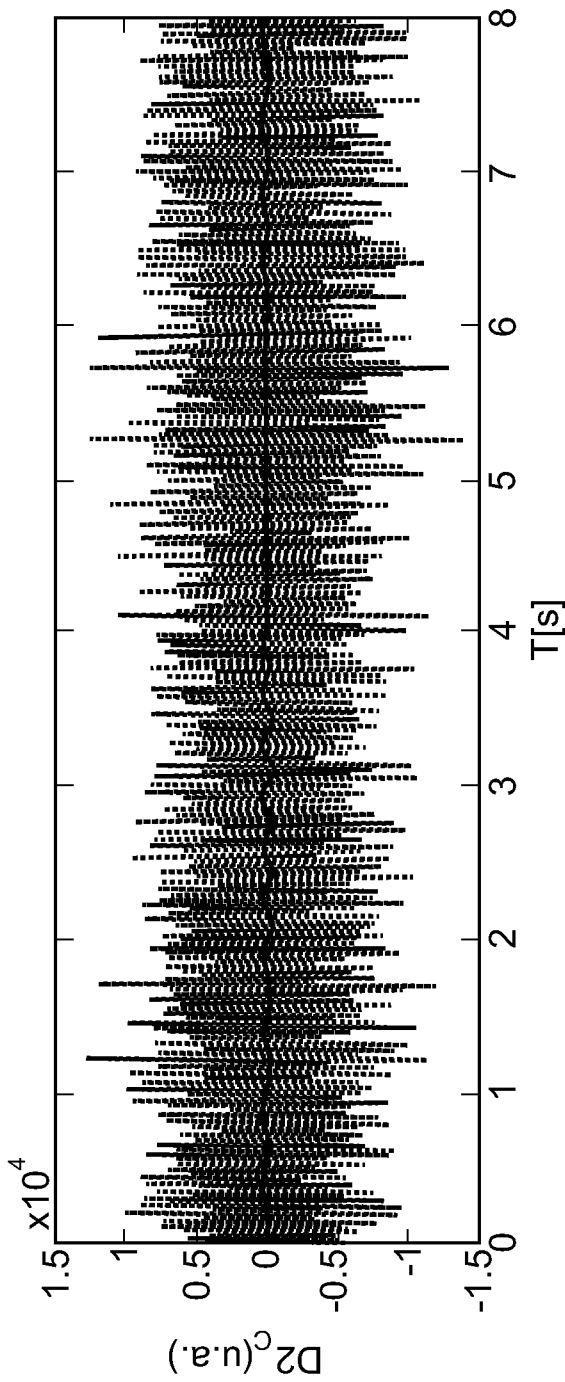


Fig. 7B

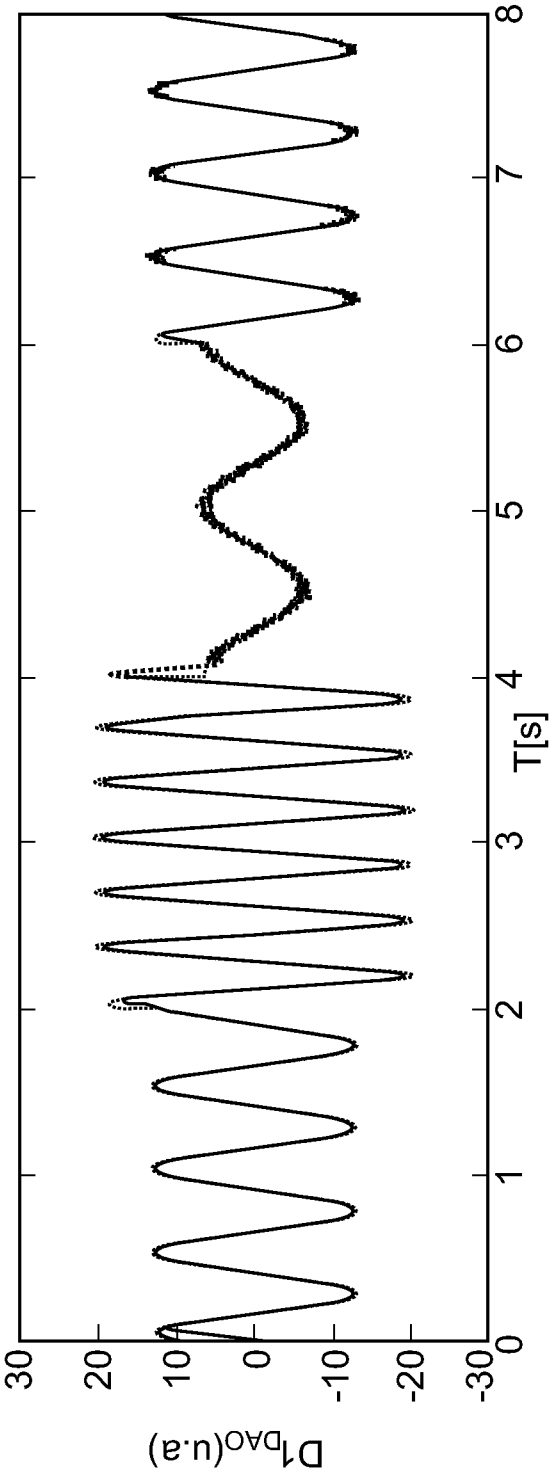


Fig. 8A

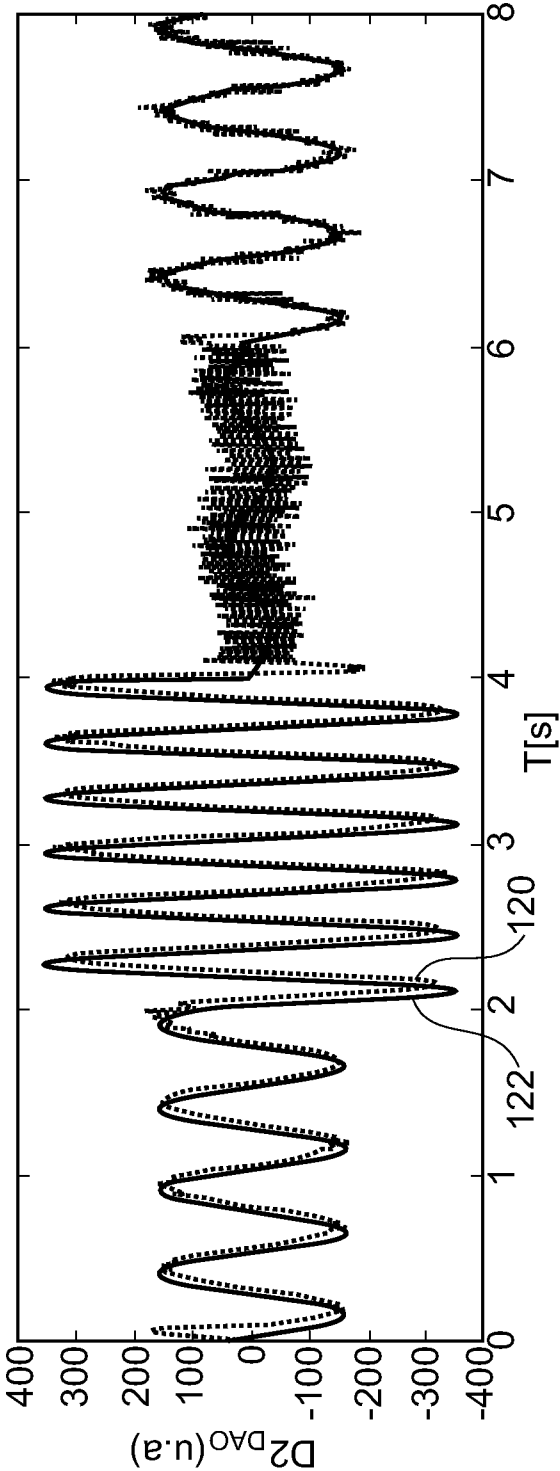


Fig. 8B

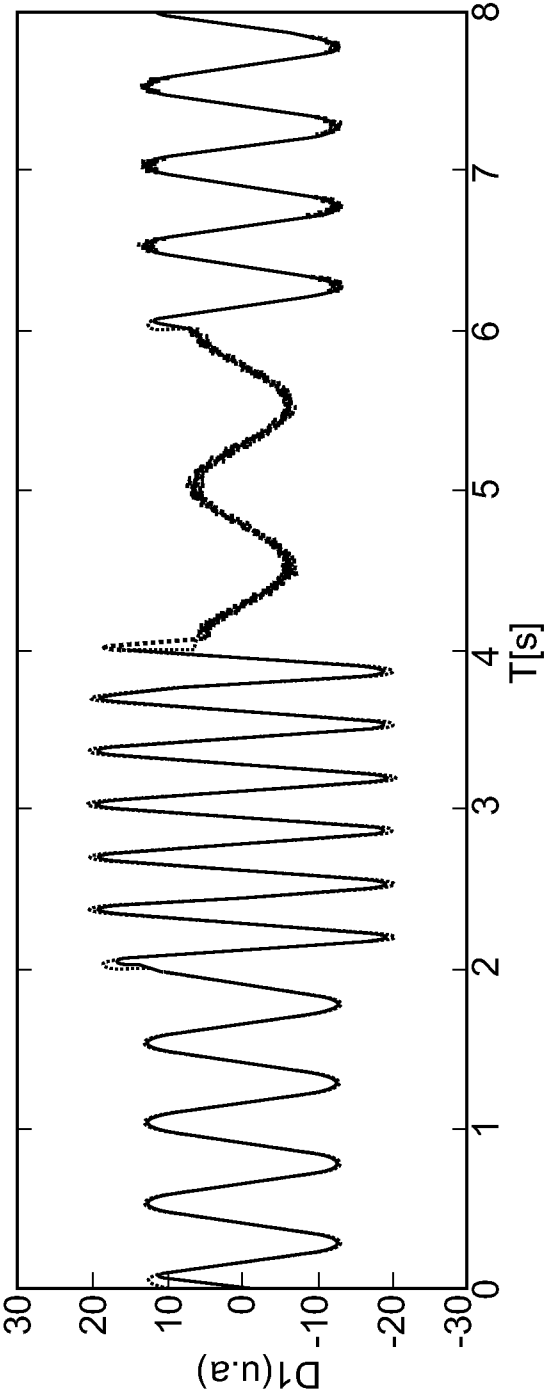


Fig. 9A

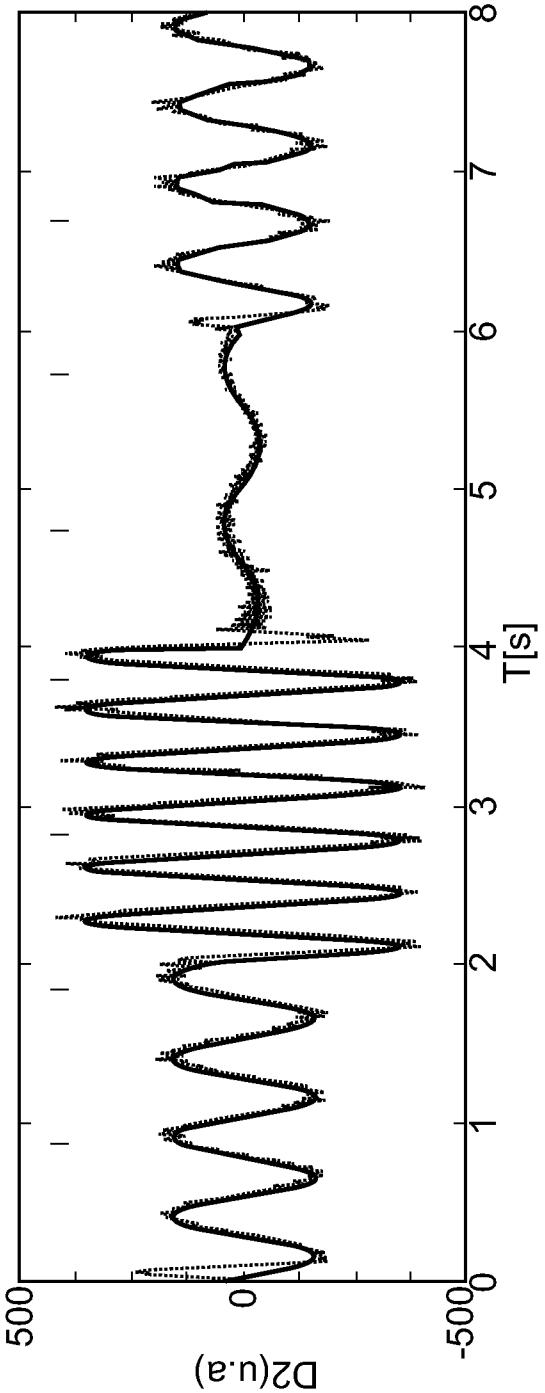


Fig. 9B

5/6

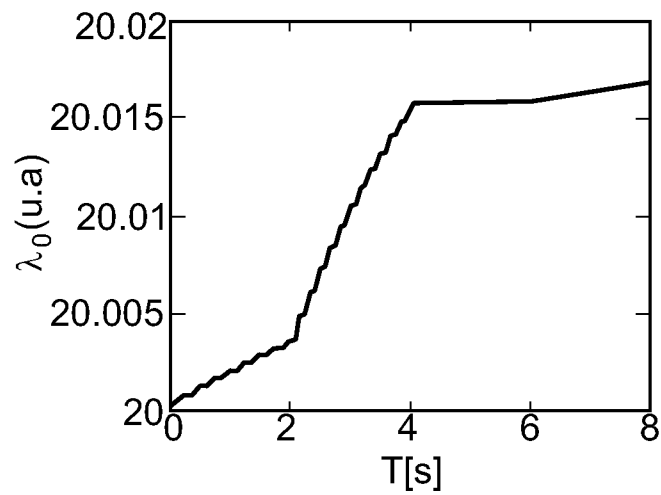


Fig. 10A

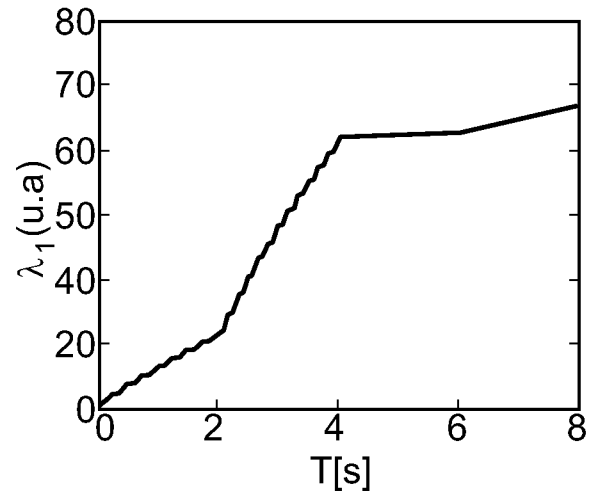


Fig. 10B

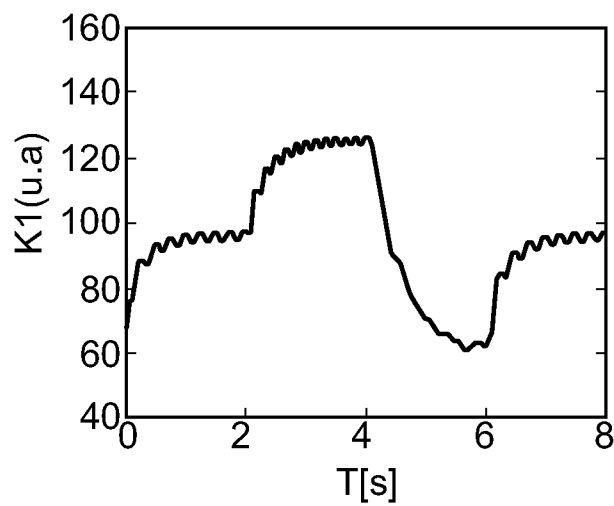


Fig. 11A

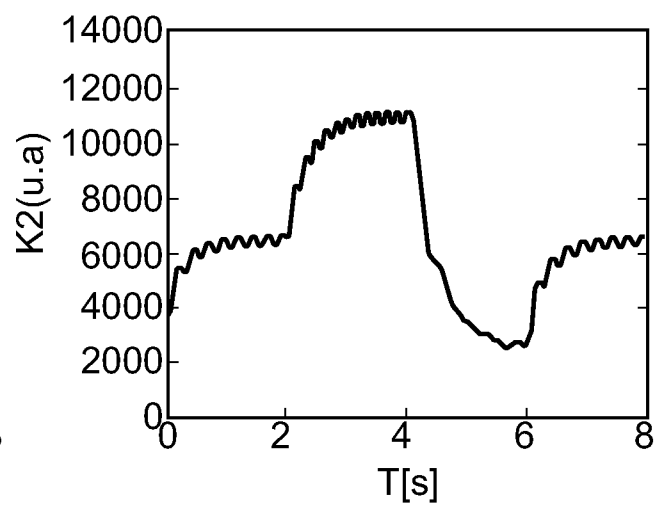


Fig. 11B

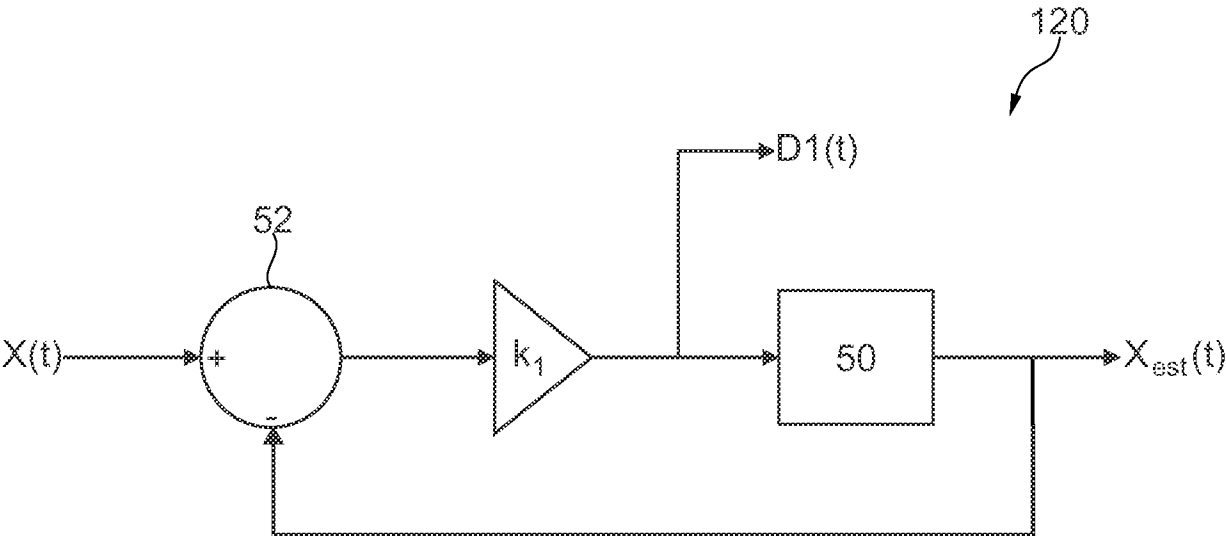


Fig. 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2016/051110

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
INV.	G06F17/10 B60W10/06 F16H61/70 G05B13/02 G05B19/18	
ADD.	G05B19/44	
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06F B60W F16H G05B		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	XINMING YAN ET AL: "Comparison of differentiation schemes for the velocity and acceleration estimations of a pneumatic system", THE 19TH WORLD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL, 24 August 2014 (2014-08-24), pages 49-54, XP055256296, Cape Town, South Africa pages 49, 51-53 ----- -/--	1-14
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 28 July 2016		Date of mailing of the international search report 04/08/2016
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Huguet Serra, G

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2016/051110

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Lilia Sidhom: "Sur les différentiateurs en temps réel : algorithmes et applications", PhD Thesis, 29 September 2011 (2011-09-29), pages 1-234, XP055256696, Retrieved from the Internet: URL:https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701576/document [retrieved on 2016-03-09] cited in the application page 33 - page 69 -----	1-14
A	GIRIN A ET AL: "High-Order Sliding-Mode Controllers of an Electropneumatic Actuator: Application to an Aeronautic Benchmark", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 17, no. 3, May 2009 (2009-05), pages 633-645, XP011255397, ISSN: 1063-6536 the whole document -----	1-14

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2016/051110

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06F17/10 B60W10/06 F16H61/70 G05B13/02 G05B19/18 G05B19/44 ADD. Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06F B60W F16H G05B Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	XINMING YAN ET AL: "Comparison of differentiation schemes for the velocity and acceleration estimations of a pneumatic system", THE 19TH WORLD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL, 24 août 2014 (2014-08-24), pages 49-54, XP055256296, Cape Town, South Africa pages 49, 51-53 ----- -/-	1-14
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 28 juillet 2016		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 04/08/2016
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Huguet Serra, G

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	Lilia Sidhom: "Sur les différentiateurs en temps réel : algorithmes et applications", PhD Thesis, 29 septembre 2011 (2011-09-29), pages 1-234, XP055256696, Extrait de l'Internet: URL:https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701576/document [extrait le 2016-03-09] cité dans la demande page 33 - page 69 -----	1-14
A	GIRIN A ET AL: "High-Order Sliding-Mode Controllers of an Electropneumatic Actuator: Application to an Aeronautic Benchmark", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 17, no. 3, mai 2009 (2009-05), pages 633-645, XP011255397, ISSN: 1063-6536 le document en entier -----	1-14