

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
20 octobre 2011 (20.10.2011)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
WO 2011/128562 A2

- (51) Classification internationale des brevets :  
G05B 13/04 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2011/050814
- (22) Date de dépôt international :  
11 avril 2011 (11.04.2011)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
1052854 14 avril 2010 (14.04.2010) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 rue  
Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :  
GROSSARD, Mathieu [FR/FR]; 66 avenue de la Marne,  
F-92120 Montrouge (FR). BOUKALLEL, Mehdi  
[FR/FR]; 16 rue Faidherbe, F-75011 Paris (FR).
- (74) Mandataire : BONNET, Michel; Cabinet Bonnet, Boîte  
n° 10, 93 rue Réaumur, F-75002 Paris (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, BR, BW, BY, BZ,  
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,  
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,  
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,  
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,  
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,  
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,  
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG,  
ZM, ZW), eurasienn (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)

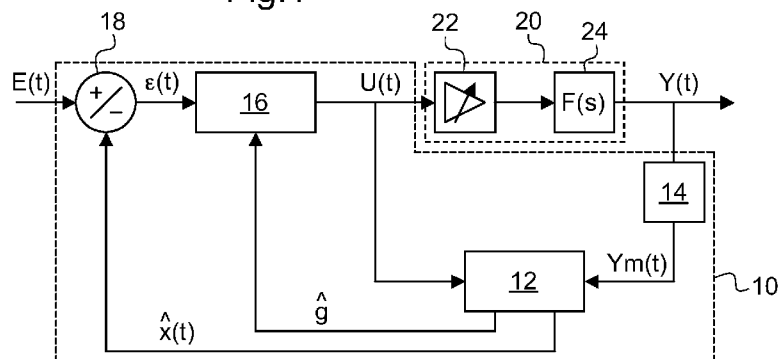
Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée  
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)

(54) Title : DEVICE AND METHOD FOR OBSERVING OR CONTROLLING A NONLINEAR SYSTEM

(54) Titre : DISPOSITIF ET PROCÉDÉ D'OBSERVATION OU DE COMMANDE D'UN SYSTÈME NON LINÉAIRE

Fig.1



(57) Abstract : This device for observing a nonlinear system (20) comprises: - at least one sensor (14) for providing a measurement vector, each component of which is a measurable output parameter of the nonlinear system (20), - a state observer processor (12), based on a predetermined state representation of the nonlinear system (20), designed to provide an estimation of a state vector of the nonlinear system as a function of the measurement vector provided and of a control vector for the nonlinear system. Furthermore, the predetermined state representation comprising a model of nonlinearity of the system (20) in the form of a gain parameter, a component of the state vector is this gain parameter.

(57) Abrégé : Ce dispositif d'observation d'un système non linéaire (20) comporte : - au moins un capteur (14) pour fournir un vecteur de

[Suite sur la page suivante]

WO 2011/128562 A2

---

mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire (20), - un processeur d'observateur d'état (12), basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire (20), conçu pour fournir une estimation d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire, En outre, la représentation d'état prédéterminée comportant un modèle de non linéarité du système (20) sous la forme d'un paramètre de gain, une composante du vecteur d'état est ce paramètre de gain.

## Dispositif et procédé d'observation ou de commande d'un système non linéaire

La présente invention concerne un dispositif d'observation d'un système non linéaire. Elle concerne également un système de commande incluant un tel dispositif d'observation, un procédé correspondant et son application à l'observation d'un système non linéaire de type Hammerstein.

Par « système non linéaire », on entend un système qui répond dynamiquement, mais de façon non conforme à un modèle linéaire, à une commande. Cette commande prend la forme d'un ensemble de paramètres transmis au système qui constituent alors les composantes d'un vecteur de commande. Lorsque cette commande peut être fournie par un processeur émetteur de signaux électriques, le système est un automate.

Le comportement non linéaire du système rend une représentation d'état de ce système plus difficile à établir. Une telle représentation d'état doit pourtant permettre de connaître l'état du système à n'importe quel instant futur si l'on possède les valeurs d'un état initial du système et la commande. La non linéarité du système rend par conséquent sa commande plus complexe. En particulier, la difficulté ou l'impossibilité de modéliser précisément un système non linéaire par une représentation d'état peut engendrer un biais entre le résultat attendu d'une commande et l'état résultant effectif du système.

Une solution consiste donc à estimer ce biais, pour éventuellement le corriger, à l'aide de capteurs permettant de mesurer l'état du système à tout moment.

Mais l'état d'un système n'est pas toujours directement mesurable. Sur la base d'une représentation d'état, il est alors possible de définir par extension un observateur d'état qui permet tout de même d'estimer l'état du système à partir de la représentation d'état, du vecteur de commande et d'un vecteur de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système. C'est pourquoi un observateur d'état est aussi appelé « capteur logiciel » du système.

L'invention s'applique ainsi plus particulièrement à un dispositif d'observation d'un système non linéaire, comportant :

- au moins un capteur pour fournir un vecteur de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire,

- un processeur d'observateur d'état, basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire, conçu pour fournir une estimation d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire.

En particulier cependant, les systèmes non linéaires présentant une non linéarité de type hystérésis sont particulièrement difficiles à modéliser par une représentation d'état. Plus précisément, les systèmes de type Hammerstein, c'est-à-dire les systèmes pouvant être représentés par une partie non linéaire, représentant la statique du système, fonctionnellement en série avec une partie linéaire représentant la dynamique du système, sont difficilement modélisables, et plus encore ceux dont la non linéarité statique est de type hystérésis.

Du fait de la présence de cette non linéarité statique de type hystérésis, contrôler un tel système par des techniques connues est une tâche difficile en pratique. La plupart des solutions existantes ne prennent pas en compte le phénomène d'hystérésis. Cela amène à des performances dégradées de la commande. Toutefois, des solutions de prise en compte de ce phénomène existent : certaines pour une commande du système en boucle ouverte (commande sans correction par une loi de commande), d'autres pour une commande en boucle fermée (commande pilotée par une loi de commande réglée à partir de mesures ou estimations issues de capteurs).

Par exemple, des techniques de modélisation numérique, comme le modèle de Preisach, permettent de décrire la non linéarité statique hystérétique, comme décrit dans l'article de P. Ge et al, intitulé "Generalized Preisach Model for Hysteresis nonlinearity of Piezoceramic Actuators", Precision Engineering, vol. 20, pages 99-111, 1997. Elles peuvent alors être associées à une méthode de commande en boucle ouverte qui consiste à compenser, par inversion du modèle, les phénomènes de non linéarité. Mais ces modèles sont généralement complexes et difficilement exploitables pour des applications à contraintes de temps réel.

Plus récemment, il a été démontré dans l'article de U. X. Tan et al, intitulé "Modeling Piezoelectric Actuator Hysteresis with Singularity Free Prandtl-Ishlinskii Model", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pages 251-256, décembre 2006, Kunming (Chine), que l'opérateur de Prandtl-Ishlinskii, moins complexe que le modèle de Preisach, présente l'avantage de posséder un inverse analytique plus facilement calculable. Cet opérateur convient mieux à une implémentation temps réel, pour laquelle le temps de calcul est toujours

critique. Mais, comme pour la plupart des autres modèles, certains cas numériques qui correspondent aux singularités de la courbe d'hystérésis empêchent l'existence mathématique de l'opérateur inverse, ou mènent parfois à de mauvais conditionnements numériques.

L'hystérésis peut également être prise en compte par un modèle de Maxwell généralisé, par un jeu d'équations différentielles décrivant la courbe d'hystérésis (modèle de Bouc-Wen par exemple), par des approches polynomiales ou itératives, à l'aide de techniques d'apprentissage par réseau de neurones, etc. Mais tous ces modèles ou techniques présentent toujours une certaine complexité et, dans un cadre plus général où les conditions d'utilisation sont changeantes, l'estimation empirique des variables paramétriques de ces modèles nécessite de multiplier les protocoles d'identification (c'est-à-dire formes, amplitudes, fréquences des signaux), sans quoi le modèle devient inadapté.

D'une façon générale, un problème de précision du modèle par rapport à la réalité de l'hystérésis se pose toujours.

Enfin, chacun de ces modèles ou techniques peut aussi être utilisé, pour une commande en boucle fermée, dans la boucle de rétroaction afin d'être pris en compte dans la loi de commande par un correcteur de commande. Mais malgré le recours éventuel à des méthodes de réduction de modèle, ces dernières techniques de commande avancées en boucle fermée peuvent parfois mener à l'obtention d'un correcteur d'ordre élevé, ce qui ne facilite pas à terme leur implémentation dans un contrôleur à contraintes de temps réel.

Il peut ainsi être souhaité de prévoir un dispositif d'observation qui permette de s'affranchir d'au moins une partie des problèmes et contraintes précités.

L'invention a donc pour objet un dispositif d'observation d'un système non linéaire, comportant :

- au moins un capteur pour fournir un vecteur de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire,
- un processeur d'observateur d'état, basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire, conçu pour fournir une estimation d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire,

dans lequel, la représentation d'état prédéterminée comportant un modèle de non linéarité du système sous la forme d'un paramètre de gain, une composante du vecteur d'état est le paramètre de gain.

Ainsi, le processeur d'observateur d'état étant conçu pour fournir une estimation de l'évolution du vecteur d'état au cours du temps, grâce à l'invention il devient aussi apte à fournir une estimation de l'évolution temporelle du paramètre de gain qui est intégré dans la représentation d'état en tant que modèle paramétrique de la non linéarité statique. En effet, la non linéarité statique peut astucieusement être simplement vue à chaque instant comme un gain statique, ce dernier évoluant par ailleurs de façon non linéaire au cours du temps. Par conséquent, plutôt que d'établir a priori un modèle global complexe et approximatif de cette non linéarité, l'invention propose d'observer à chaque instant le paramètre de gain correspondant, c'est-à-dire l'effet instantané de cette non linéarité sur le système. Puisque ce modèle est simple, il permet l'observation et donc le suivi de la non linéarité en temps réel.

De façon optionnelle, le processeur d'observateur d'état est basé sur une représentation d'état comportant une partie non linéaire modélisée par le paramètre de gain représentant la statique du système non linéaire, et une partie linéaire modélisée par une fonction de transfert prédéterminée.

De façon optionnelle également, le processeur d'observateur d'état est un filtre de Kalman étendu.

L'invention a également pour objet un système de commande d'un système non linéaire comportant :

- un dispositif d'observation tel que défini précédemment, et
- un correcteur du vecteur de commande basé sur une loi de commande comportant un gain réglé au cours du temps en fonction des valeurs prises par le paramètre de gain du vecteur d'état.

De façon optionnelle, le correcteur est de type PID à gains variables.

De façon optionnelle également, le correcteur de type PID à gains variables comporte un gain proportionnel défini comme inversement proportionnel au paramètre de gain du vecteur d'état.

L'invention a également pour objet un procédé d'observation d'un système non linéaire comportant les étapes suivantes :

- réception, par un processeur d'observateur d'état basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire, d'un vecteur

de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire,

- estimation, par le processeur d'observateur d'état, d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire,

dans lequel, la représentation d'état prédéterminée comportant un modèle de non linéarité du système sous la forme d'un paramètre de gain, l'estimation du vecteur d'état comporte une estimation du paramètre de gain en tant que composante du vecteur d'état.

L'invention a également pour objet un procédé de commande d'un système non linéaire comportant les étapes d'un procédé d'observation tel que défini précédemment et une étape de mise à jour, par un correcteur de commande basé sur une loi de commande du système non linéaire, d'un gain de ce correcteur de commande en fonction des valeurs prises par le paramètre de gain du vecteur d'état au cours du temps.

L'invention a également pour objet l'application d'un procédé d'observation ou de commande tel que défini précédemment à l'observation ou à la commande d'un système non linéaire de type Hammerstein à hystérésis statique, notamment un micro actionneur piézoélectrique ou une articulation robotique à transmission par câble de bras manipulateur.

Enfin, l'invention a également pour objet un programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur et/ou exécutable par un processeur, comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé d'observation ou de commande tel que défini précédemment, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement la structure générale d'un système de commande d'un système non linéaire, selon un mode de réalisation de l'invention,
- la figure 2 illustre les étapes successives d'un procédé d'observation et de commande mis en œuvre par le système de la figure 1,
- la figure 3 illustre l'utilisation du système de la figure 1 pour la commande d'un micro actionneur piézoélectrique,

- la figure 4 illustre à l'aide de diagrammes un exemple de dépendance de la non linéarité statique du micro actionneur piézoélectrique de la figure 3 en fonction de la fréquence de signaux excitateurs,
- la figure 5 illustre un exemple de diagramme de Bode d'une fonction de transfert susceptible de modéliser la linéarité dynamique du micro actionneur piézoélectrique de la figure 3,
- la figure 6 illustre par diagramme une comparaison des performances d'un système de commande selon l'invention par rapport à un système de commande classique dans l'utilisation de la figure 3,
- la figure 7 illustre par diagramme les variations observées d'un paramètre de gain modélisant la non linéarité statique du micro actionneur piézoélectrique de la figure 3 grâce à la mise en œuvre d'un procédé d'observation selon l'invention, et
- la figure 8 illustre l'utilisation du système de la figure 1 pour la commande d'une articulation robotique à transmission par câble de bras manipulateur,

Le système de commande 10 représenté schématiquement sur la figure 1 comporte un dispositif d'observation 12, 14, ce dernier comportant des moyens logiciels classiques (processeur, mémoires mortes et/ou vives, bus de transmission de données numériques, etc.) d'implémentation d'un processeur d'observateur d'état 12 et au moins un capteur 14 pour la fourniture d'au moins un paramètre mesuré  $Y_m(t)$  au processeur d'observateur d'état 12. Il comporte également un correcteur 16 de vecteur de commande basé sur une loi de commande et un comparateur d'entrée/sortie 18 pour la fourniture d'un signal d'asservissement  $\varepsilon(t)$  au correcteur 16.

Ce système de commande 10 est relié à un système non linéaire 20. Dans la suite de la description, on suppose que le système non linéaire 20 est de type Hammerstein, c'est-à-dire que sa réaction à une commande peut être modélisée par une partie non linéaire 22, représentant la statique du système, fonctionnellement en série avec une partie linéaire 24 représentant la dynamique du système.

Plus précisément, le système de commande 10 est conçu pour que son correcteur 16 transmette un vecteur de commande  $U(t)$  en entrée du système non linéaire 20. Cette transmission est par exemple électrique, la ou les composantes du vecteur de commande  $U(t)$  étant composée(s) d'un ou plusieurs signaux électriques excitateurs du système 20.

En réaction à l'excitation transmise par le vecteur de commande  $U(t)$ , le système non linéaire 20 réagit statiquement et dynamiquement et son état évolue. Le capteur 14 du système de commande 10 est alors conçu et placé pour mesurer au moins un paramètre de sortie du système non linéaire. En représentation vectorielle, le capteur 14 est placé en sortie mesurable  $Y(t)$  du système non linéaire 20 pour fournir ainsi un vecteur de mesure  $Y_m(t)$  dont chaque composante est la valeur mesurée d'un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire 20.

Une modélisation du système non linéaire 20 et de l'évolution de son état peut être réalisée sur la base d'une représentation d'état prédéterminée, dans laquelle l'état du système non linéaire prend la forme d'un vecteur d'état  $X(t)$ . Comme cela sera détaillé par la suite, selon l'invention, le vecteur d'état  $X(t)$  défini pour représenter l'état du système 20 comporte, en tant que composante, un paramètre de gain  $g$  modélisant la partie non linéaire statique 22. Ce paramètre de gain  $g$  n'est pas directement mesurable en sortie mais peut être estimé, via une estimation du vecteur d'état  $X(t)$ , grâce à l'implémentation d'un capteur logiciel que constitue le processeur d'observateur d'état 12.

A cet effet, le processeur d'observateur d'état 12 reçoit en entrée le vecteur de mesure  $Y_m(t)$  issu du capteur 14 et le vecteur de commande  $U(t)$  issu du correcteur 16 et fournit, sur la base de la représentation d'état prédéterminée du système non linéaire 20, une estimation  $\hat{X}(t)$  du vecteur d'état  $X(t)$ . Le fonctionnement du processeur d'observateur d'état 12 sera détaillé ultérieurement, sur la base d'un exemple non limitatif d'observateur d'état généralement utilisé, de type filtre de Kalman étendu.

Pour permettre un fonctionnement en boucle fermée du système de commande 10, l'estimation  $\hat{X}(t)$  fournie par le processeur d'observateur d'état 12 est transmise au comparateur d'entrée/sortie 18 qui compare concrètement la valeur estimée d'au moins une partie des composantes du vecteur d'état  $X(t)$  à un signal de consigne  $E(t)$  pour fournir le signal d'asservissement  $\epsilon(t)$  au correcteur 16. De plus, selon l'invention, les valeurs estimées  $\hat{g}$  au cours du temps par le processeur d'observateur d'état 12 du paramètre de gain  $g$  sont fournies au correcteur 16 dont la loi de commande sur laquelle il est basé comporte un gain réglé au cours du temps en fonction de ces valeurs.

On va maintenant détailler la modélisation du système non linéaire 20 et l'établissement de sa représentation d'état.

Selon cette modélisation, et comme indiqué précédemment, un paramètre de gain  $g$  est intégré dans la représentation d'état en tant que modèle paramétrique de la non linéarité statique du système 20. En effet, à partir du moment où le système non linéaire 20 peut être considéré comme présentant une non linéarité statique et une linéarité dynamique séparables, ce qui est notamment le cas lorsqu'il est de type Hammerstein, y compris lorsque sa non linéarité statique est de type hystérésis, la non linéarité peut astucieusement être vue à chaque instant comme un gain statique, ce dernier évoluant par ailleurs de façon non linéaire au cours du temps. La dynamique du système 20, linéaire, peut alors être représentée indépendamment de sa statique par une fonction de transfert  $F(s)$  en coordonnées de Laplace, c'est-à-dire la transformée de Laplace de l'équation différentielle linéaire qui représente la partie linéaire entre l'entrée et la sortie du système. Par souci de simplicité dans la suite de la description, l'ordre de cette fonction de transfert  $F(s)$  est fixé arbitrairement à deux. Un ordre supérieur pourrait être envisagé, mais cela alourdirait inutilement les calculs présentés ci-dessous. On obtient alors le modèle suivant pour la partie linéaire 24 du système 20 :

$$F(s) = \frac{1}{\frac{1}{w_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{w_n} s + 1}, \text{ où } w_n \text{ et } \xi \text{ représentent respectivement la pulsation}$$

naturelle et l'amortissement du système 20.

En choisissant de traiter la non linéarité statique, notamment l'hystérésis, comme un simple gain statique  $g$  susceptible de varier au cours du temps, le système non linéaire 20 se ramène finalement à un système modélisé linéairement résultant de la mise en série du gain statique variable  $g$  et de la fonction de transfert  $F(s)$ . La fonction de transfert du système 20 complet entre la commande  $u(s)$  et la sortie mesurable  $y(s)$  s'écrit alors :

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{g}{\frac{1}{w_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{w_n} s + 1}.$$

Par souci de simplicité de nouveau, on suppose que la sortie mesurable  $Y(t)$  du système comporte en fait uniquement un paramètre de position  $x$  qui est également une composante du vecteur d'état  $X(t)$ , celui-ci comportant en outre la dérivée temporelle de cette position  $x$  et le paramètre de gain  $g$ . Davantage de paramètres mesurables et/ou composantes pourraient être envisagés (par exemple

une composante d'accélération) mais cela alourdirait inutilement les calculs présentés ci-dessous.

En représentation d'état, c'est-à-dire sous forme matricielle, le système 20 peut alors être défini par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -w_n^2 & -2\xi w_n & w_n^2 u \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ g \end{bmatrix}, \text{ soit } \dot{X} = AX, \text{ où } X \text{ est le vecteur d'état et } A \text{ la}$$

matrice de représentation d'état du système 20.

Cette relation définit l'évolution temporelle du système. Elle n'est pas linéaire puisqu'elle fait intervenir la commande  $u$  dans la matrice  $A$ .

Le processeur d'observateur d'état 12, lorsqu'il est de type filtre de Kalman étendu, peut alors être basé sur cette représentation d'état et défini par le modèle d'observation d'état suivant :

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ g \end{bmatrix}, \text{ soit } Y = CX, \text{ où } Y \text{ est le vecteur de mesure (ici la position } x) \text{ et } C$$

la matrice d'observation. Cette relation définit l'observation de la sortie du système 20.

Pour pouvoir être implémenté dans le processeur d'observateur d'état 12, ce modèle de système 20 nécessite d'être discrétisé. Pour cela, on utilise par exemple la transformation bilinéaire de Tustin suivante :

$$s = \frac{2}{T_e} \frac{z-1}{z+1}, \text{ dans laquelle } s \text{ désigne la variable de Laplace et } z \text{ la transformée en } Z$$

du système échantillonné.  $T_e$  désigne par ailleurs la période d'échantillonnage du système.

Après calcul (non détaillé car classique), la forme discrète de la représentation et de l'observation d'état s'écrit :

$$X_{k+1} = F_{k+1}(u_k, u_{k+1})X_k,$$

$$Y_{k+1} = H_{k+1}X_k, \text{ où}$$

$$F_{k+1} = \left( I_{3 \times 3} - \frac{T_e}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -w_n^2 & -2\xi w_n & w_n^2 u_{k+1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \left( I_{3 \times 3} + \frac{T_e}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -w_n^2 & -2\xi w_n & w_n^2 u_k \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right), \text{ et}$$

$$H_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ces équations de récurrence discrètes permettent de modéliser l'évolution de l'état du système à l'étape (k+1) connaissant l'état à l'étape k et décrivent le fait que la sortie  $Y_{k+1}$  n'est autre que la position x à l'étape k.

Une fois la modélisation sous forme discrète établie, l'observateur de Kalman étendu est implémenté dans le processeur 12 pour estimer l'état X(t) à chaque pas de temps. Or la non linéarité statique, par exemple l'hystérésis statique, du système 20 étant présente sous la forme du gain g dans l'état, il est alors possible d'estimer l'évolution de ce gain statique g au cours du temps par cet observateur.

On rappelle ci-dessous brièvement le principe du filtrage de Kalman étendu, qui fait par ailleurs partie des connaissances générales de l'homme du métier.

Sur la base du modèle précédemment défini, en notant  $w_k$  le vecteur bruit d'état sur l'intervalle de temps  $[t_k, t_{k+1}]$ , blanc, gaussien, de moyenne nulle et de matrice de covariance  $Q_k = E[w_k, w_k^T]$ , en notant également  $v_k$  le vecteur bruit de mesure à l'instant  $t_k$ , blanc, gaussien, de moyenne nulle et de matrice de covariance  $R_k = E[v_k, v_k^T]$ , en supposant connu un état initial du système, le filtre de Kalman étendu implémenté par le processeur d'observateur d'état 12 réalise l'estimation du vecteur d'état à chaque instant  $t_k$  par récurrence et plus précisément par un calcul de prédiction puis un calcul d'actualisation.

Pour cela, les notations suivantes sont adoptées :

- l'estimation du vecteur d'état à l'instant  $t_{k+1}$  est notée  $\hat{X}_{k+1/k}$  après le calcul de prédiction mais avant actualisation par la connaissance de la mesure  $Ym_{k+1}$ ,
- l'estimation du vecteur d'état à l'instant  $t_{k+1}$  est notée  $\hat{X}_{k+1/k+1}$  après le calcul d'actualisation,
- la matrice de covariance de l'erreur d'estimation à l'instant  $t_{k+1}$  est notée  $P_{k+1/k}$  après le calcul de prédiction mais avant actualisation par la connaissance de la mesure  $Ym_{k+1}$ ,
- la matrice de covariance de l'erreur d'estimation à l'instant  $t_{k+1}$  est notée  $P_{k+1/k+1}$  après le calcul d'actualisation.

Le calcul de prédiction se fait alors à l'aide des équations suivantes :

$$\hat{X}_{k+1/k} = f(\hat{X}_{k/k}, U_k), \text{ et}$$

$$P_{k+1/k} = F_k P_{k/k} F_k^T + Q_k, \text{ où } F_k = F(\hat{X}_{k/k}, U_k) = \left. \frac{\partial f(X, U_k)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_{k/k}}.$$

Le calcul d'actualisation se fait ensuite à l'aide des équations suivantes :

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1},$$

$$\hat{X}_{k+1/k+1} = \hat{X}_{k+1/k} + K_{k+1} (Y_{m_{k+1}} - h(\hat{X}_{k+1/k}, U_{k+1})), \text{ et}$$

$$P_{k+1/k+1} = (I_{3 \times 3} - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1/k}, \text{ où } H_{k+1} = H(\hat{X}_{k+1/k}, U_{k+1}) = \left. \frac{\partial h(X, U_{k+1})}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_{k+1/k}}.$$

On notera que, conformément au modèle de gain statique adopté pour définir

$$\text{la non linéarité du système 20, } F_k = \left. \frac{\partial f(X, U_k)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_{k/k}} \text{ et } H_{k+1} = \left. \frac{\partial h(X, U_{k+1})}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_{k+1/k}}$$

sont des matrices jacobiennes indépendantes du vecteur d'état  $X_k$ , ce qui simplifie en pratique l'implémentation dans le processeur d'observateur d'état.

Pour un fonctionnement en boucle fermée du système de commande 10, le correcteur 16 doit lui aussi être basé sur une loi de commande intégrant le modèle précité. Différents types de lois de commande existent. Une régulation de type PID (pour « proportionnel, intégral, dérivé ») est tout à fait adaptée et est utilisée de façon très répandue en automatique. Elle est détaillée ci-après à titre purement illustratif, sachant que d'autres régulations peuvent être appliquée dans le cadre de l'invention.

Conformément à la régulation PID et au modèle de représentation d'état retenu dans ce mode de réalisation, le correcteur 16 respecte la forme canonique suivante dans le domaine de Laplace :

$$K_{PID}(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right), \text{ où } \frac{T_d}{N}, T_d, T_i \text{ et } K \text{ représentent les gains de la}$$

régulation.

Ainsi, si l'on souhaite obtenir une fonction de transfert en boucle fermée, pour le système non linéaire 20 corrigé par ce correcteur 16, de la forme suivante :

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{g}{\frac{1}{w_0^2} s^2 + \frac{2\xi_0}{w_0} s + 1}, \text{ où } w_0 \text{ et } \xi_0 \text{ représentent respectivement la pulsation}$$

naturelle et l'amortissement du système attendu, les gains de la régulation prennent les valeurs suivantes :

$$\frac{T_d}{N} = \frac{1}{2\xi_0 w_0}, T_i = \frac{2\xi}{w_n} - \frac{1}{2\xi_0 w_0}, T_d = \frac{1/w_n}{T_i} - \frac{1}{2\xi_0 w_0} \text{ et } K = \frac{w_0 T_i}{2g\xi_0}.$$

En particulier, on note que le gain proportionnel K du correcteur 16 est fonction du paramètre de gain statique g du système non linéaire 20. Or ce paramètre de gain g varie du fait de la non linéarité du système 20 et, comme nous l'avons vu, grâce à l'invention, les variations de ce paramètre de gain peuvent être estimées en temps réel par le processeur d'observateur d'état 12. Nous montrons ainsi que la régulation PID mise en œuvre par le correcteur 16 peut être rendue adaptative très simplement par prise en compte du paramètre de gain g dans le calcul de son gain proportionnel K, sans qu'un modèle global complexe de la non linéarité statique du système 20 soit nécessaire. Cela reste valable bien sûr dans le cas particulier où la non linéarité statique est de type hystérésis.

Le fonctionnement en boucle fermée du système de commande 10 décrit précédemment va maintenant être détaillé en référence à la figure 2.

Au cours d'une première étape d'asservissement 100, le comparateur 18 du système de commande 10 compare une consigne E(t) à l'état du système 20 connu à partir d'une mesure de la sortie Y(t) du système. Cet état est par exemple issu de l'estimation  $\hat{X}(t)$  qui en est faite par le processeur d'observateur d'état 12 en fonction de la mesure Ym(t). Le signal d'asservissement  $\varepsilon(t)$  est fourni en sortie du comparateur 18.

Ensuite, au cours d'une étape 102, le correcteur 16 de type PID adaptatif met à jour son gain proportionnel K en fonction de la valeur  $\hat{g}$  du paramètre de gain g, cette valeur  $\hat{g}$  étant fournie par le processeur d'observateur d'état 12 en fonction de la mesure Ym(t) et de la précédente commande, pour fournir un nouveau vecteur de commande U(t).

Au cours de l'étape 104 suivante, ce vecteur de commande est appliqué au système non linéaire 20. En réaction, le système non linéaire 20 évolue au cours d'une étape 106.

Puis, au cours d'une étape de mesure 108, le processeur d'observateur d'état 12 reçoit une nouvelle valeur de la mesure Ym(t) de la part du capteur 14. Il en déduit une nouvelle estimation du vecteur d'état (étape 110), également en fonction de la dernière valeur du vecteur de commande, cette estimation étant fournie d'une part au comparateur 18 pour qu'il mette à jour sa connaissance de l'état du système 20 et

d'autre part au correcteur 16 pour qu'il adapte sa régulation en fonction de la nouvelle valeur du paramètre de gain  $g$ .

Les étapes 100 à 110 sont répétées en boucle. On notera qu'elles peuvent être mises en œuvre sous forme d'instructions d'un programme d'ordinateur et être synchronisées lors de leur exécution par le signal d'horloge d'un processeur de l'ordinateur qui exécute le programme.

Comme illustré sur la figure 3, une application envisageable de l'invention concerne l'observation et éventuellement la commande en boucle fermée d'un micro actionneur piézoélectrique 20A dans le domaine de la micro robotique.

Un tel actionneur est dit de structure « unimorphe », qui est une structure couramment utilisée en micro robotique. Cela signifie que lorsqu'il est soumis à une différence de tension à ses bornes, ce type d'actionneur est capable de produire un mouvement de flexion. En exploitant ce mouvement, il est possible de saisir des objets de très petites tailles pour réaliser des tâches de micro manipulation. Un micro actionneur piézoélectrique se comporte comme un système non linéaire de type Hammerstein à hystérésis statique. Conformément à l'invention sa commande peut être assurée par le système de commande 10 décrit précédemment, dans lequel l'hystérésis statique est prise en compte sous la forme du paramètre de gain  $g$  intégré dans le vecteur d'état estimé en temps réel par le processeur d'observateur d'état 12.

Dans l'installation représentée schématiquement sur la figure 3, le micro actionneur piézoélectrique 20A est fixé à l'une de ses extrémités contre un support 26. Le capteur 14 du système de commande 10, qui est précisément dans cette application un capteur laser de grande résolution pour pouvoir mesurer les déplacements micrométriques du micro actionneur piézoélectrique 20A, est disposé pour que l'autre extrémité du micro actionneur, libre et mobile en flexion, se trouve dans son faisceau d'émission laser.

Le processeur d'observateur d'état 12, le correcteur 16 et le comparateur 18 sont par exemple implémentés sous forme programmée dans un ordinateur 28 qui comporte de façon classique au moins un microprocesseur, au moins une mémoire de type RAM, ROM et/ou autre, et au moins un bus de transmission de données entre le microprocesseur et la mémoire. L'ordinateur fournit un signal de commande  $U(t)$ , éventuellement amplifié par un amplificateur 30, au micro actionneur piézoélectrique 20A auquel il est raccordé électriquement.

La figure 4 illustre l'hystérésis statique mesurée du micro actionneur piézoélectrique 20A et sa dépendance à la fréquence du signal excitateur de commande : en fonction de la valeur  $f$  de cette fréquence, 20 Hz, 300 Hz, 600 Hz ou 900 Hz, il peut être en effet mesuré expérimentalement et reporté sur les diagrammes de la figure 4 que la flexion  $D$  du micro actionneur en fonction de la tension  $U$  à ses bornes décrit quatre courbes d'hystérésis différentes.

Conformément au modèle défini précédemment, on rappelle que :

- l'hystérésis statique du micro actionneur piézoélectrique 20A est modélisée par le paramètre de gain statique  $g$  variable au cours du temps,
- la dynamique du micro actionneur piézoélectrique 20A est modélisée par une fonction de transfert à deux pôles dont le diagramme de Bode est illustré sur la figure 5.

Sur cette figure 5, la courbe A décrit les valeurs qui peuvent être retrouvées expérimentalement tandis que la courbe B résulte d'une simulation. On remarque que ces deux courbes sont très proches sur une grande plage de fréquences de sorte que le modèle de linéarité dynamique choisi peut être considéré comme fidèle à la dynamique réelle du micro actionneur piézoélectrique 20A.

Expérimentalement, pour une période d'échantillonnage  $T_e$  de 0,1 ms et des gains de régulation du correcteur PID adaptatif 16 calculés pour une erreur statique nulle, aucun dépassement de consigne et un temps de montée de 20 ms, on obtient une réponse du déplacement asservi conforme à la courbe B du diagramme de la figure 6, alors que le même correcteur PID mais non rendu adaptatif par la prise en compte du paramètre de gain  $g$  conduirait à la courbe A de cette même figure.

En particulier, on observe des dépassements de consigne sur la courbe A alors qu'il n'y en a aucun sur la courbe B. Cela montre que l'observation des variations du paramètre de gain  $g$  intégré dans le vecteur d'état et leur prise en compte dans la régulation améliore les performances de contrôle des systèmes d'Hammertein à hystérésis.

La figure 7 illustre par diagramme les variations correspondantes du paramètre de gain  $g$  telles qu'observées par le processeur d'observateur d'état 12.

Enfin, comme illustré sur la figure 8, une autre application envisageable de l'invention concerne l'observation et la commande en boucle fermée d'une articulation robotique 20B à transmission par câble de bras manipulateur.

Le schéma de principe de la figure 8 représente cette articulation 20B sous la forme d'une poulie 32 libre en rotation autour d'un axe 34. La rotation est

commandée par un moteur 36 qui, par l'intermédiaire d'un bras 38, d'une vis sans fin 40, d'un câble 42 et d'un mécanisme de guidage 44 et de rappel 46 du câble 42, entraîne la rotation  $\theta_a$  de la poulie 32. Cette chaîne de transmission du mouvement rend l'articulation robotique à transmission par câble conforme à un système de type Hammerstein à hystérésis.

Dans cette application, le déplacement mesuré et observé est la rotation  $\theta_a$  de la poulie 32 autour de l'axe 34. La mesure de cette rotation  $\theta_a$  est réalisée par un capteur angulaire 48 relié à une carte d'acquisition 50. Elle est imparfaite du fait de l'existence de l'hystérésis due principalement aux frottements du câble 42 sur la poulie 32.

La commande  $\theta_m$  réalisée par le moteur 36 est elle-même mesurée par un codeur angulaire 52 du moteur. Cette mesure est de bonne qualité mais le codeur angulaire 52 est éloigné de la transmission articulaire.

Les mesures précitées sont fournies au processeur d'observateur d'état 12 qui, dans cette application également, fournit en réponse une estimation des variations du paramètre de gain  $g$  défini pour prendre en compte le phénomène d'hystérésis.

De même que dans l'application précédente, le processeur d'observateur d'état 12, le correcteur 16 et le comparateur 18 sont par exemple implémentés sous forme programmée dans un ordinateur (non illustré) qui comporte de façon classique au moins un microprocesseur, au moins une mémoire de type RAM, ROM et/ou autre, et au moins un bus de transmission de données entre le microprocesseur et la mémoire.

Beaucoup d'autres applications sont envisageables tant le domaine de l'automatique des systèmes non linéaires est vaste. Notamment, la micromanipulation fait appel à des actionneurs fortement non linéaires.

Il apparaît clairement qu'un système de commande tel que celui décrit précédemment permet d'identifier, grâce au processeur d'observateur d'état 12 associé au capteur 14, puis éventuellement de prendre en compte dans la synthèse de loi de commande adaptative a posteriori, grâce au correcteur 16, le phénomène de non linéarité statique et en particulier d'hystérésis existant pour certaines classes de systèmes non linéaires.

Cette identification est très simple puisqu'elle est basée sur l'observation d'un vecteur d'état qui inclut un paramètre de gain statique. Elle peut donc être réalisée en temps réel. Or c'est justement ce simple paramètre de gain statique observé au

cours du temps qui rend compte de façon précise et exhaustive de la non linéarité du système, sans qu'il soit nécessaire d'établir au préalable un modèle global complet de cette non linéarité.

En appliquant le résultat de cette observation à un correcteur PID, très couramment utilisé en commande en boucle fermée, pour faire varier son gain proportionnel  $K$ , on le rend adaptatif et donc performant. La précision de la commande résultante est améliorée.

Pour un système à non linéarité statique de type hystérésis, la méthode présentée précédemment comporte donc l'avantage majeur de ne pas nécessiter de modélisation particulière préalable de l'hystérésis. En effet, le plus souvent, la forme de cette hystérésis est fonction de paramètres extérieurs et environnementaux qui ne sont pas contrôlés. Il devient alors difficile de modéliser toutes les formes possibles de courbes d'hystérésis et d'embarquer l'ensemble de ses formes possibles dans un système de commande. De plus, les stratégies connues pour modéliser l'hystérésis se basent généralement sur des essais expérimentaux menés sur le système. Or, comme cela a été vu en référence à la figure 4, l'hystérésis est un phénomène qui dépend notamment des amplitudes et fréquences des signaux excitateurs en entrée du système. Cela suppose donc de connaître à l'avance la gamme d'amplitudes et de fréquences des signaux qui seront utilisés a posteriori lors de l'asservissement du système. A l'inverse, la méthode décrite précédemment ne nécessite pas de protocoles expérimentaux préalables pour caractériser le phénomène d'hystérésis. La modélisation qui en est faite est un simple gain observé par un observateur d'état, par exemple un filtre de Kalman étendu.

On notera par ailleurs que l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation et applications décrits précédemment. Il apparaîtra en effet à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées aux modes de réalisation et applications décrits ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

En particulier, dans les modes de réalisation et applications décrits précédemment, il a été fait le choix d'un correcteur de type PID, mais certains pourront préférer adopter d'autres méthodologies pour la régulation de la commande. Le principe de modélisation et d'observation de la non linéarité du système commandé présenté précédemment reste compatible avec d'autres lois de commande.

Enfin, dans les revendications qui suivent, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant les revendications aux modes de réalisation exposés dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les équivalents que les revendications visent à couvrir du fait de leur formulation et dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en œuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

## REVENDEICATIONS

1. Dispositif d'observation d'un système non linéaire (20 ; 20A ; 20B), comportant :

- au moins un capteur (14) pour fournir un vecteur de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire (20 ; 20A ; 20B),
- un processeur d'observateur d'état (12), basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire (20 ; 20A ; 20B), conçu pour fournir une estimation d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire,

caractérisé en ce que, la représentation d'état prédéterminée comportant un modèle de non linéarité du système (20 ; 20A ; 20B) sous la forme d'un paramètre de gain, une composante du vecteur d'état est le paramètre de gain.

2. Dispositif d'observation selon la revendication 1, dans lequel le processeur d'observateur d'état (12) est basé sur une représentation d'état comportant une partie non linéaire (22) modélisée par le paramètre de gain représentant la statique du système non linéaire (20 ; 20A ; 20B), et une partie linéaire (24) modélisée par une fonction de transfert prédéterminée.

3. Dispositif d'observation selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le processeur d'observateur d'état (12) est un filtre de Kalman étendu.

4. Système (10) de commande d'un système non linéaire (20 ; 20A ; 20B) comportant :

- un dispositif d'observation (12, 14) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, et
- un correcteur (16) du vecteur de commande basé sur une loi de commande comportant un gain réglé au cours du temps en fonction des valeurs prises par le paramètre de gain du vecteur d'état.

5. Système de commande selon la revendication 4, dans lequel le correcteur (16) est de type PID à gains variables.

6. Système de commande selon la revendication 5, dans lequel le correcteur de type PID à gains variables comporte un gain proportionnel défini comme inversement proportionnel au paramètre de gain du vecteur d'état.

7. Procédé d'observation d'un système non linéaire (20 ; 20A ; 20B) comportant les étapes suivantes :

- réception (108), par un processeur d'observateur d'état (12) basé sur une représentation d'état prédéterminée du système non linéaire (20 ; 20A ; 20B), d'un vecteur de mesure dont chaque composante est un paramètre de sortie mesurable du système non linéaire,
- estimation (110), par le processeur d'observateur d'état (12), d'un vecteur d'état du système non linéaire en fonction du vecteur de mesure fourni et d'un vecteur de commande du système non linéaire,

caractérisé en ce que, la représentation d'état prédéterminée comportant un modèle de non linéarité du système (20 ; 20A ; 20B) sous la forme d'un paramètre de gain, l'estimation (110) du vecteur d'état comporte une estimation du paramètre de gain en tant que composante du vecteur d'état.

8. Procédé de commande d'un système non linéaire comportant les étapes d'un procédé d'observation selon la revendication 7 et une étape de mise à jour (102), par un correcteur de commande (16) basé sur une loi de commande du système non linéaire (20 ; 20A ; 20B), d'un gain de ce correcteur de commande en fonction des valeurs prises par le paramètre de gain du vecteur d'état au cours du temps.

9. Application d'un procédé d'observation ou de commande selon la revendication 7 ou 8 à l'observation ou à la commande d'un système non linéaire de type Hammerstein à hystérésis statique (20 ; 20A ; 20B), notamment un micro actionneur piézoélectrique (20A) ou une articulation robotique à transmission par câble de bras manipulateur (20B).

10. Programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur et/ou exécutable par un processeur, caractérisé en ce qu'il comprend des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé d'observation ou de commande selon la revendication 7 ou 8, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

Fig.1

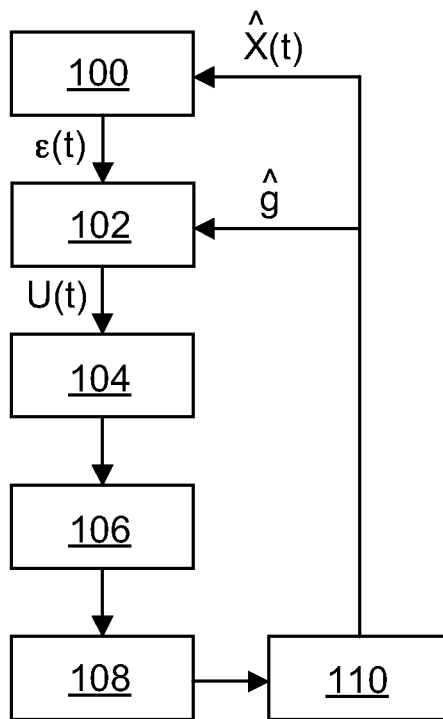
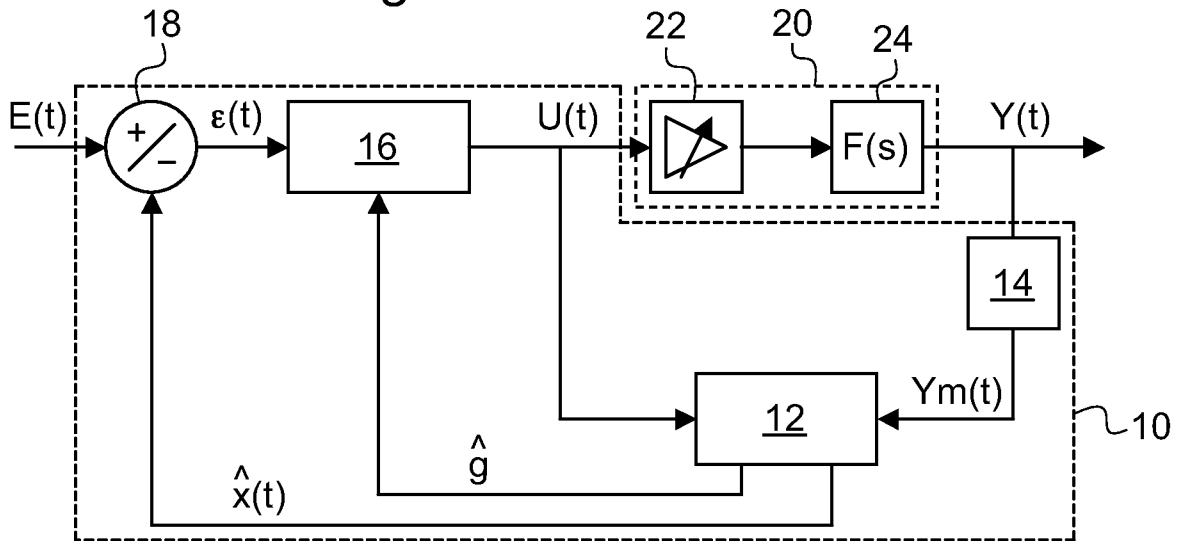


Fig.2

Fig.3

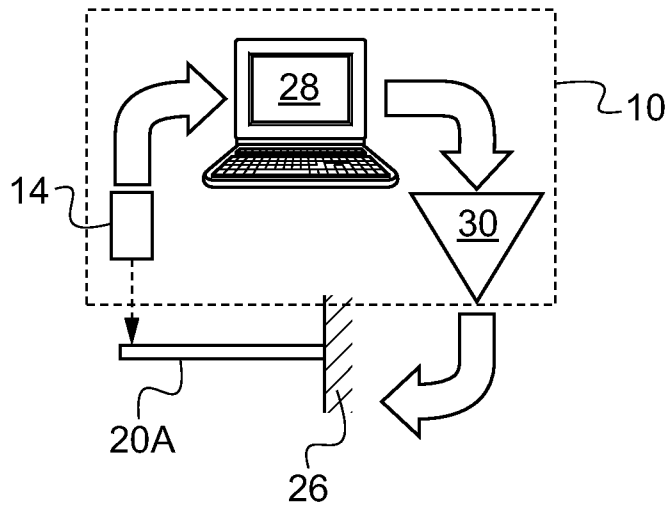
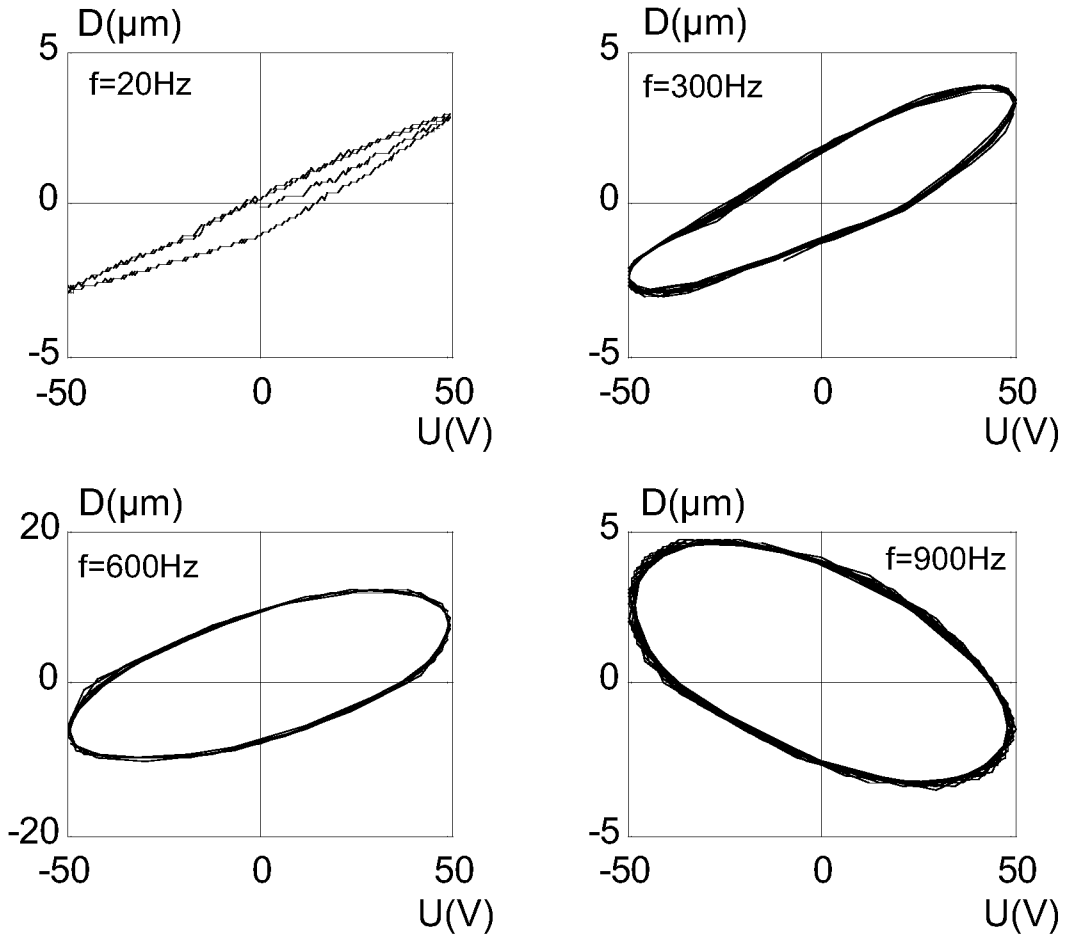
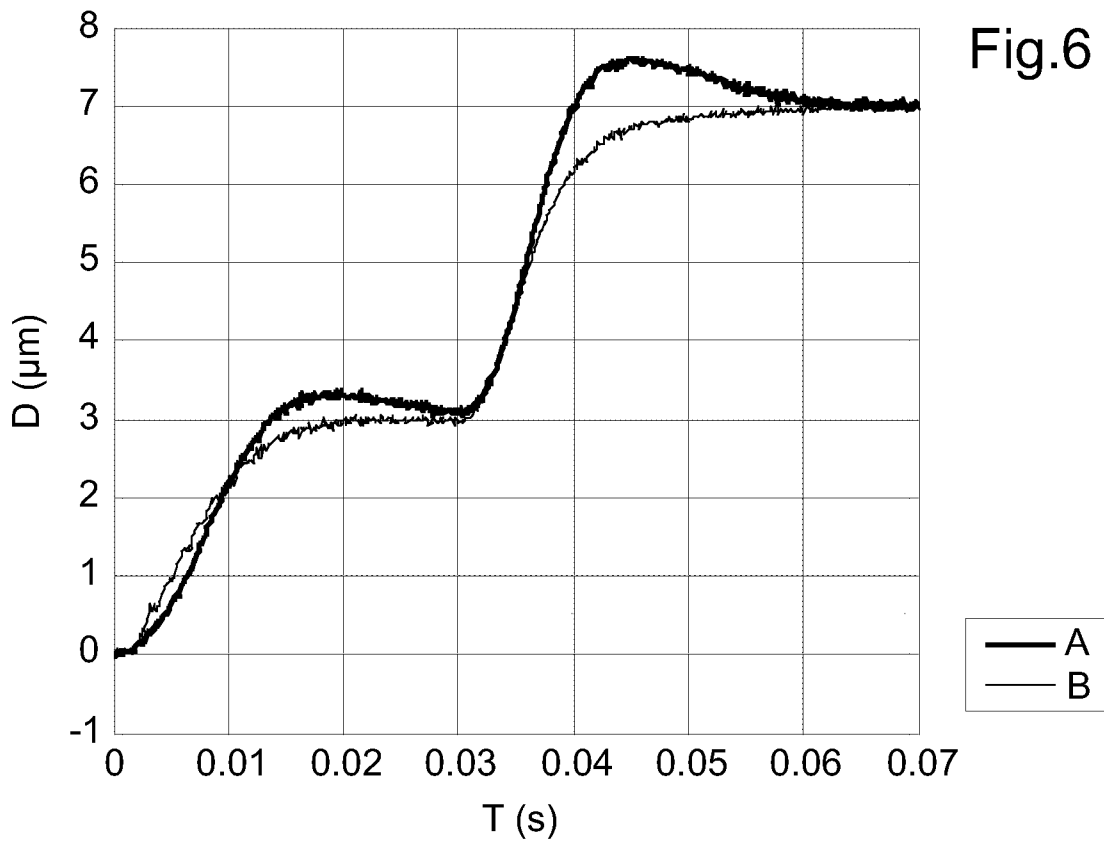
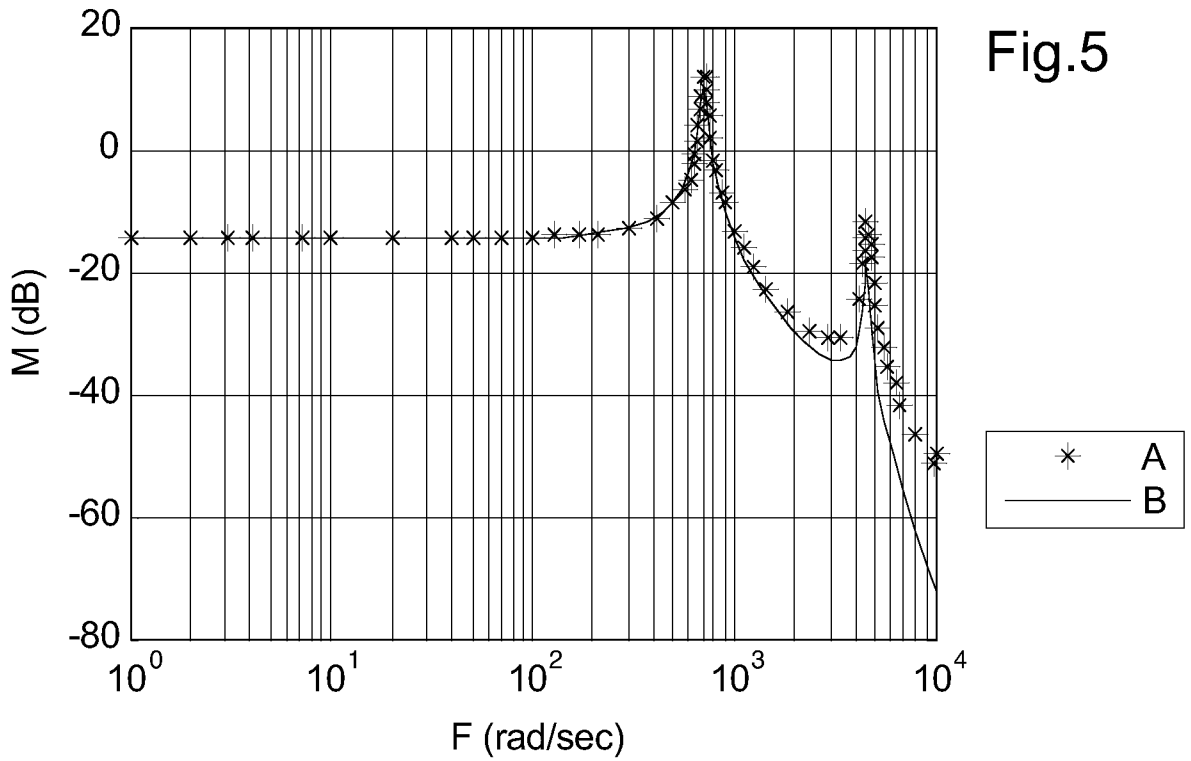


Fig.4





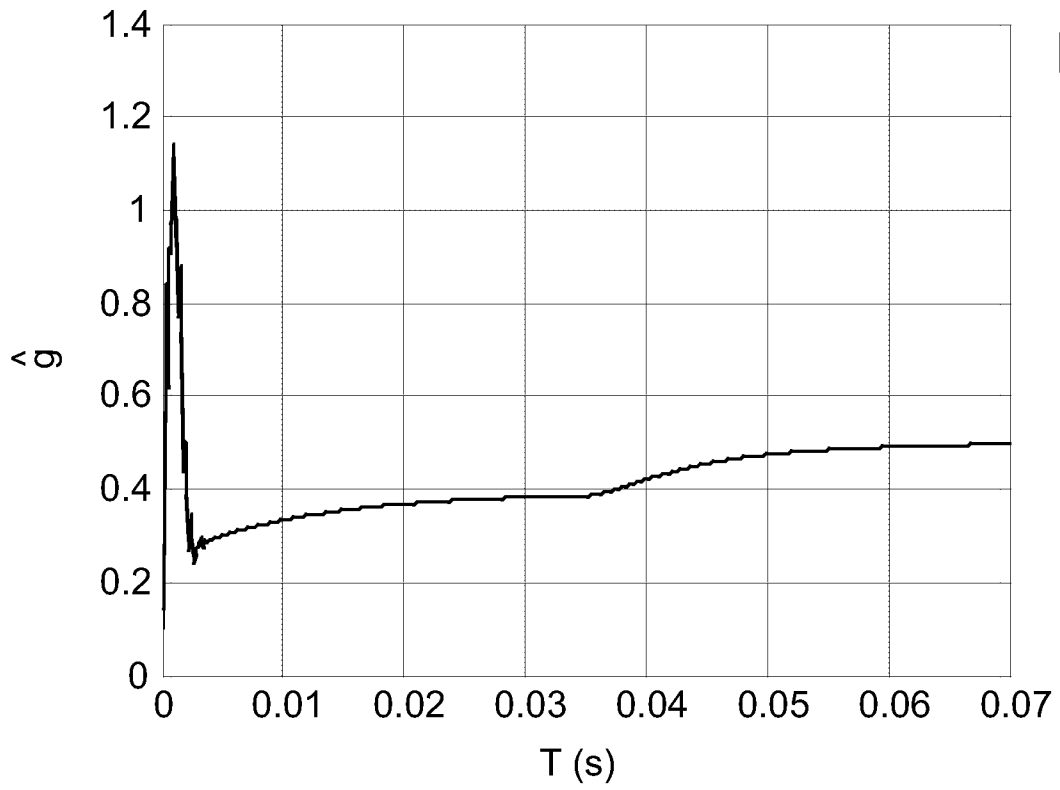


Fig.7

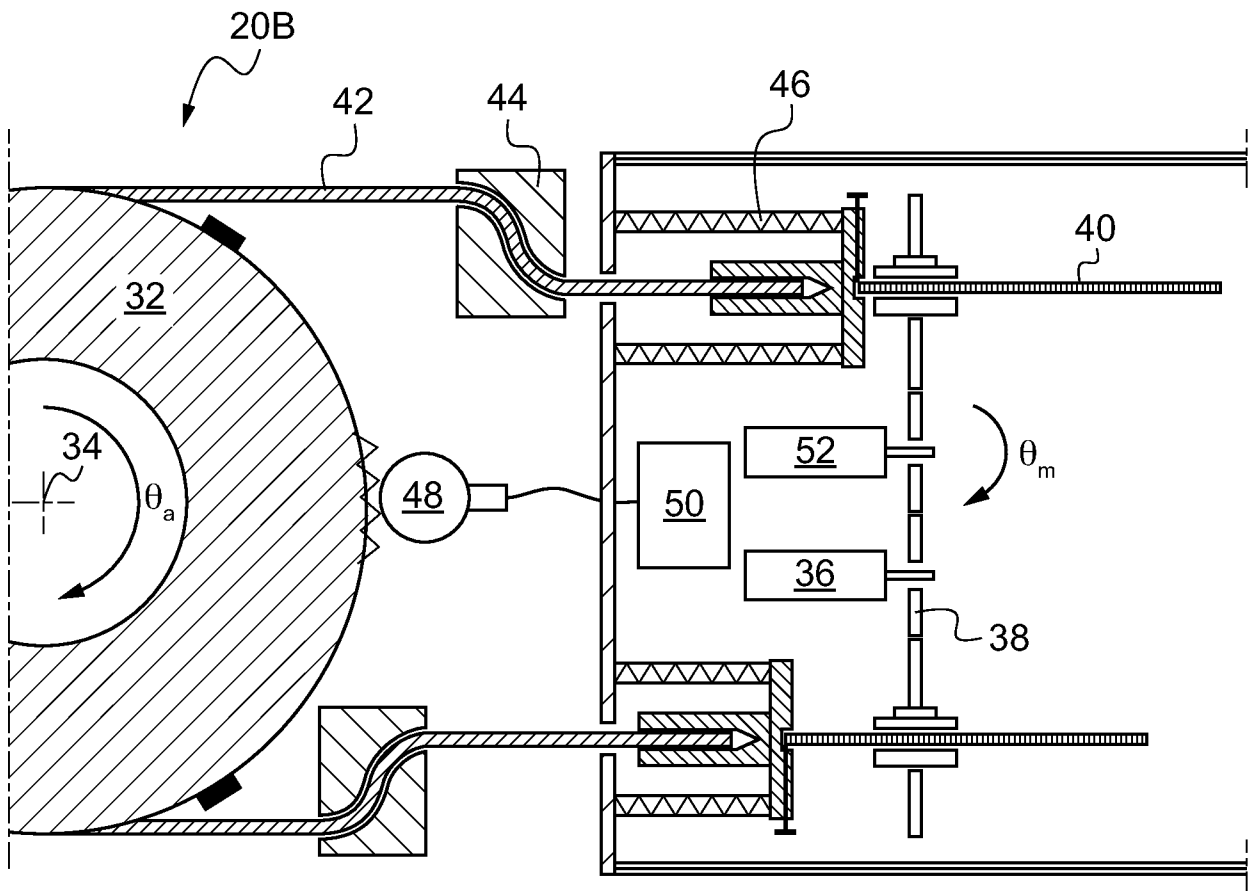


Fig.8