

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale

WO 2014/128027 A1

(43) Date de la publication internationale
28 août 2014 (28.08.2014)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
G01P 15/13 (2006.01) G01P 15/08 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2014/052652
- (22) Date de dépôt international :
11 février 2014 (11.02.2014)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
13/00361 19 février 2013 (19.02.2013) FR
- (71) Déposant : SAGEM DEFENSE SECURITE [FR/FR];
18-20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne Billancourt (FR).
- (72) Inventeurs : BRISSON, Raphaël; SAGEM DEFENSE SECURITE, 18-20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne Billancourt (FR). RAGOT, Vincent; SAGEM DEFENSE SECURITE, 18-20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne Billancourt (FR).
- (74) Mandataires : LAVIALLE, Bruno et al.; Cabinet Boettcher, 16 rue Médéric, F-75017 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, 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, LT, 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, 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 : SENSOR WITH ELECTROSTATIC PENDULAR ACCELEROMETER AND METHOD OF CONTROLLING SUCH A SENSOR

(54) Titre : CAPTEUR A ACCELEROMETRE PENDULAIRE ELECTROSTATIQUE ET PROCEDE DE COMMANDE D'UN TEL CAPTEUR

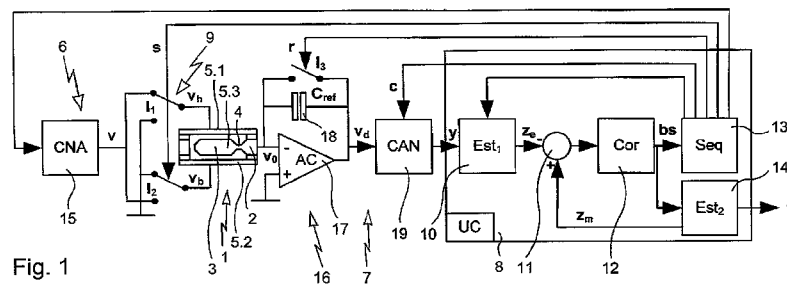


Fig. 1

(57) Abstract : Accelerometric sensor, comprising at least one electrostatic pendular accelerometer having a first fixed electrode and a second fixed electrode which are fixed to a housing and which are linked to an excitation circuit and a third electrode which is carried by a pendulum linked to the housing so as to be mobile and which is linked to a detection circuit. The excitation circuit has an output hooked up to a switch linked to the first and second electrodes, the switch having a first connection position and a second connection position for selectively hooking the first electrode and the second electrode up to the excitation circuit. The detection circuit, the excitation circuit, the switch and the detection circuit are linked to a control circuit arranged so that the first and second electrodes are excited by pulse trains in such a way as to maintain the pendulum in a preset position and to determine an acceleration undergone by the pendulum. Method of controlling such a sensor.

(57) Abrégé : Capteur accélérométrique, comprenant au moins un accéléromètre pendulaire électrostatique ayant une première électrode et une deuxième électrode fixes qui sont fixées à un boîtier et qui sont reliées à un circuit d'excitation et une troisième électrode qui est portée par un pendule relié au boîtier pour être mobile et qui est reliée à un circuit de détection. Le circuit d'excitation

[Suite sur la page suivante]



WO 2014/128027 A1

a une sortie raccordée à un commutateur relié aux première et deuxième électrodes, le commutateur ayant une première position de connexion et une deuxième position de connexion pour raccorder sélectivement au circuit d'excitation la première électrode et la deuxième électrode. Le circuit de détection, le circuit d'excitation, le commutateur et le circuit de détection sont reliés à un circuit de commande agencé pour que les première et deuxième électrodes soient excitées par des train d'impulsions de manière à maintenir le pendule dans une position de consigne et à déterminer une accélération subie par le pendule. Procédé de commande d'un tel capteur.

**CAPTEUR A ACCELEROMETRE PENDULAIRE ELECTROSTATIQUE ET
PROCEDE DE COMMANDE D'UN TEL CAPTEUR.**

La présente invention concerne un capteur à accéléromètre pendulaire électrostatique et un procédé de commande d'un tel capteur. Le capteur est par exemple un capteur de type MEMS (de l'anglais Micro Electro-Mechanical Systems).

Un accéléromètre pendulaire électrostatique comprend un boîtier auquel est reliée une masse sismique reliée au boîtier par une ou plusieurs charnières positionnées de telle manière que la masse sismique forme un pendule mobile par rapport au boîtier soit en translation soit en rotation. Les déplacements de la masse sismique sous l'effet de l'accélération sont généralement détectés au moyen de trois électrodes. Une première électrode fixe et une deuxième électrode fixe sont solidaires du boîtier et reliées à un circuit d'excitation. La troisième électrode, mobile, est portée par le pendule et reliée à un circuit de détection.

Chaque électrode fixe forme avec l'électrode mobile une capacité dont la valeur dépend de leur écartement. En l'absence de défaut de réalisation et lorsque le capteur n'est pas soumis à une accélération suivant son axe sensible, le pendule demeure dans une position neutre dans laquelle les deux capacités sont égales. En revanche, lorsque le pendule est soumis à une accélération suivant son axe sensible, il se déplace entraînant une diminution de la capacité formée par l'électrode mobile et l'une des électrodes fixes, et une augmentation de la capacité formée par l'électrode mobile et l'autre des électrodes fixes. Cette variation des capacités dépend également des déformations du boîtier et du pendule.

Dans un fonctionnement en boucle ouverte, l'accélération appliquée selon l'axe sensible du capteur est déduite de la différence existant entre les deux ca-

pacités. Ce mode de fonctionnement présente cependant plusieurs inconvénients :

5 - la direction de l'axe sensible varie selon la position du pendule lorsque celui-ci est mobile en pivotement ;

 - il existe un décalage (ou offset) dû aux dissymétries de fabrication des capacités (différence de surface des électrodes et/ou différence des entrefers entre les électrodes) ;

10 - il existe des non-linéarités des mesures en raison de non-linéarités des capacités en fonction du déplacement des électrodes ;

 - lors des mouvements du pendule, le gaz environnant ce dernier se comprime et se dilate engendrant des efforts sur le pendule ;

15 - la bande passante est réduite par la fréquence propre du pendule.

 Dans un fonctionnement en boucle fermée, la position du pendule est asservie dans une position neutre, ou position de consigne, à mi-distance entre les électrodes fixes, en appliquant au pendule une force électrostatique. La force électrostatique doit donc compenser l'accélération appliquée selon l'axe sensible, ce qui permet l'estimation de cette dernière. La force électrostatique est le résultat de tensions appliquées aux électrodes pour maintenir à zéro la différence des capacités.

 Le capteur comprend un circuit d'excitation pour chaque électrode fixe, agencé pour alimenter les électrodes de manière à engendrer ladite force électrostatique.

30 Le caractère quadratique de la force électrostatique vis-à-vis des tensions appliquées complique la conception du circuit de commande réalisant l'asservissement du pendule et l'estimation de l'accélération. Pour contourner cette difficulté, il est connu de commander le pendule en tout ou rien à l'aide d'impulsions de tensions

35

calibrées. Ces impulsions sont appliquées à l'une ou l'autre des électrodes selon qu'il s'agit de tirer ou de pousser le pendule pour le ramener vers sa position de consigne. La densité d'impulsions destinées à pousser (ou à tirer) le pendule, c'est-à-dire la quantité d'impulsions par intervalle de temps, est alors une fonction affine de l'accélération à mesurer. Ainsi, une accélération nulle sera compensée par un nombre égal en moyenne d'impulsions dans les deux sens.

10 Toutefois, si la symétrie des impulsions appliquées aux deux électrodes est imparfaite (principalement en raison d'une différence entre la durée de chaque impulsion appliquée à la première électrode fixe et la durée de chaque impulsion appliquée à la deuxième électrode fixe), la densité d'impulsion est modifiée par l'asservissement pour maintenir le pendule en position de consigne, ce qui biaise l'estimée de l'accélération. En prenant comme exemple un accéléromètre dont chacune des tensions appliquées durant la phase de commande exerce une force moyenne sur une durée $T_s = 1\mu s$ équivalant à une accélération du pendule de 50g, il faut, pour maîtriser le biais d'un tel accéléromètre à une valeur inférieure à 50 μg , que la symétrie des impulsions soit maîtrisée avec une précision inférieure au rapport 50 μg /50g soit 1.10^{-6} .
15
20
25 Il est donc nécessaire de maîtriser la durée des impulsions appliquées à chaque électrode de telle manière que la dissymétrie n'excède par $1.10^{-6} \times 1\mu s$ soit 1ps, ce qui est extrêmement délicat.

30 Les dissymétries de réalisation qui sont le point faible de la commande en tout ou rien sont donc un obstacle majeur à l'obtention de meilleures performances de ces capteurs.

 Un but de l'invention est de fournir un moyen permettant d'améliorer les performances de tels capteurs.

35 A cet effet, on prévoit, selon l'invention, un

capteur accélérométrique comprenant au moins un accéléromètre pendulaire électrostatique ayant une première électrode et une deuxième électrode fixes qui sont fixées à un boîtier et qui sont reliées à un circuit d'excitation, et une troisième électrode qui est portée par un pendule relié au boîtier pour être mobile et qui est reliée à un circuit de détection. Le circuit d'excitation a une sortie raccordée à un commutateur relié aux première et deuxième électrodes, le commutateur ayant une première position de connexion et une deuxième position de connexion pour raccorder sélectivement au circuit d'excitation la première électrode et la deuxième électrode, et le circuit d'excitation, le commutateur et le circuit de détection sont reliés à un circuit de commande agencé pour que les première et deuxième électrodes soient excitées par des impulsions de manière à maintenir le pendule dans une position de consigne et à déterminer une accélération subie par le pendule.

Ainsi, les impulsions sont délivrées à chaque électrode par le même circuit d'excitation limitant ainsi les problèmes liés aux dissymétries de fabrication et de vieillissement de l'électronique du circuit d'excitation.

L'invention concerne également un procédé de commande d'un capteur comprenant au moins un accéléromètre pendulaire électrostatique ayant une première électrode et une deuxième électrode fixes qui sont fixées à un boîtier et qui sont reliées à un circuit d'excitation, et une troisième électrode qui est portée par un pendule relié au boîtier pour être mobile et qui est reliée à un circuit de détection. Le procédé de commande comprend les étapes de :

- exciter alternativement l'une et l'autre des électrodes fixes par des impulsions de détection pour détecter une première capacité et une deuxième capacité entre l'électrode mobile et les électrodes fixes,

- estimer une position du pendule à partir des capacités détectées,

- déterminer une erreur d'asservissement correspondant à une différence entre la position estimée et une position de consigne,

- à partir de l'erreur d'asservissement, déterminer une commande déterminant si la prochaine impulsion de détection va pousser ou tirer le pendule,

-calculer l'accélération à mesurer en fonction de la position de consigne et de la commande déterminée,

- lors d'une phase de commande, exciter l'une ou l'autre des électrodes fixes par des impulsions de commande pour asservir à zéro l'erreur d'asservissement.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description qui suit de modes de réalisation particuliers non limitatifs de l'invention.

Il sera fait référence aux dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'un capteur selon un premier mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 2 est une vue schématique partielle d'un capteur selon un deuxième mode de réalisation ;

- la figure 3 est une vue analogue à la figure 2 d'un capteur selon un troisième mode de réalisation ;

- la figure 4 est un chronogramme illustrant la commande du capteur.

En référence aux figures, le capteur accélérométrique de l'invention comprend un accéléromètre pendulaire électrostatique généralement désigné en 1. L'accéléromètre 1 comprend un boîtier 2 auquel est reliée une masse sismique 3 reliée au boîtier 2 par une char-

nière 4 positionnée de telle manière que la masse sismique 3 forme un pendule mobile par rapport au boîtier 2 selon un mouvement de pivotement.

L'accéléromètre 1 comprend une première électrode fixe 5.1 et une deuxième électrode fixe 5.2 qui sont solidaires du boîtier 2 et qui sont reliées à un circuit d'excitation généralement désigné en 6, et une troisième électrode 5.3 constituant la masse sismique 3 et reliée à un circuit de détection généralement désigné en 7. Un circuit de commande généralement désigné en 8 est relié au circuit d'excitation 6 et au circuit de détection 7 pour piloter ceux-ci.

Le circuit d'excitation 6 a une sortie raccordée à un commutateur 9 relié à la première électrode 5.1 et à la deuxième électrode 5.2. Le commutateur 9 a une première position de connexion et une deuxième position de connexion pour raccorder sélectivement au circuit d'excitation 6 la première électrode 5.1 et la deuxième électrode 5.2. Plus précisément, le commutateur 9 comprend un interrupteur I_1 agencé pour relier la première électrode 5.1 soit à la sortie du circuit d'excitation 6 (première position de connexion) soit à la masse (deuxième position de connexion) et un interrupteur I_2 agencé pour relier la deuxième électrode 5.2 soit à la sortie du circuit d'excitation 6 (deuxième position de connexion) soit à la masse (première position de connexion). Le commutateur 9 est relié au circuit de commande 8 pour être piloté par celui-ci.

Le circuit de commande 8 comprend un premier estimateur 10 ayant une entrée reliée au circuit de détection 7 et une sortie reliée à une entrée négative d'un sommateur 11 ayant une sortie reliée à une entrée d'un correcteur 12 ayant une sortie reliée à un séquenceur 13. Le circuit de commande 8 comprend en outre un deuxième estimateur 14 ayant une entrée reliée à la sortie du cor-

recteur 12, une sortie reliée à l'entrée additive du som-
mateur 11 et une sortie fournissant l'estimée de
l'accélération γ_e .

5 Dans le premier mode de réalisation représenté à
la figure 1, le circuit d'excitation 6 comprend un
convertisseur numérique analogique 15 raccordé au commu-
tateur 9 et piloté par le circuit de commande 8.

10 Le circuit de détection 7 comprend un étage am-
plificateur principal 16 comportant un amplificateur de
charge 17 équipé d'un condensateur de bouclage 18 de ca-
pacité C_{ref} et d'un interrupteur I_3 . L'étage amplificateur
a une entrée reliée à la troisième électrode 5.3 et une
sortie reliée à une entrée d'un convertisseur analogique
numérique 19 ayant une sortie reliée au premier estima-
15 teur 10 de l'unité de commande 8.

Le fonctionnement du capteur va maintenant être
décrit.

L'unité de commande 8 gère le fonctionnement du
capteur et en particulier la chronologie des diverses
20 opérations échantillonnées à une fréquence F_s (selon des
périodes $T_s = 1/F_s$, voir la figure 4). Le séquenceur 13
séquence les opérations à l'intérieur de la période
d'échantillonnage T_s et d'une période d'échantillonnage
(n) T_s à l'autre ($n+1$) T_s . Le séquenceur 13 de l'unité de
25 commande 8 pilote de manière séquentielle et cyclique le
convertisseur numérique analogique 15 par une commande u ,
les interrupteurs analogiques I_1 , I_2 par une commande s et
le convertisseur analogique numérique 19 par une commande
 c et l'interrupteur analogique I_3 par une commande r .

30 Selon l'état logique de la commande s , l'une des
électrodes 5.1, 5.2 est reliée à la sortie v du conver-
tisseur numérique analogique 15 tandis que l'autre élec-
trode 5.2, 5.1 est simultanément reliée à la masse. On
notera que le séquenceur 13 est agencé pour commander
35 cette commutation lorsque la sortie v est à zéro afin

d'éviter des perturbations transitoires lors de la commutation.

Les tensions v_h et v_b appliquées respectivement aux électrodes 5.1, 5.2 sont séquencées de sorte à mesurer les capacités C_h (capacité formée entre les électrodes 5.1 et 5.3) et C_b (capacité formée entre les électrodes 5.2 et 5.3) aux fins d'appliquer la force électrostatique permettant d'asservir le pendule à sa position de consigne imposée par l'unité de commande. En supposant nulle la vitesse initiale du pendule, la durée T_i de chaque impulsion appliquée à chacune des électrodes 5.1, 5.2 est choisie suffisamment courte pour que le déplacement z provoqué par ladite impulsion au bout de la durée T_s reste petit devant l'entrefer e existant entre ladite électrode fixe 5.1, 5.2 et l'électrode mobile 5.3.

L'interrupteur I_3 , qui boucle l'amplificateur de charge 17, est commandé par le signal r issu du séquenceur 13 et provoque, par contre-réaction, le maintien à un potentiel fixe, par exemple zéro comme sur le schéma, par l'amplificateur de charge 17, du potentiel v_0 à l'électrode 5.3.

La tension de sortie v_a de l'amplificateur de charge 17 est convertie en une grandeur numérique y par le convertisseur analogique numérique 19 piloté par la commande s .

L'estimateur 10 fournit l'estimée z_e du déplacement du pendule à partir de la grandeur y .

L'estimateur 14 fournit à l'entrée additive du sommateur 11 une perturbation z_m déterminée de façon connue en soi pour exciter et estimer certains termes d'erreurs de sorte à en compenser les effets, comme on le verra plus loin.

Le sommateur détermine la différence $z_m - z_e$ qui est transmise au correcteur 12 qui élabore une commande bs valant +1 ou -1 selon qu'il convient de pousser ou de

tirer sur le pendule pour ramener à zéro l'entrée du correcteur 12. Ainsi, le correcteur 12 assure l'asservissement à zéro de la différence $z_m - z_e$.

L'estimateur 14 détermine en outre l'estimée γ_e de l'accélération à mesurer.

Dans le procédé de l'invention, chaque période d'échantillonnage T_s comprend trois phases principales, à savoir :

- une première phase de détection D_1 dans laquelle la tension V_d est détectée pour le couple d'électrodes 5.1 et 5.3, et convertie en une grandeur Y_1 ;

- une deuxième phase de détection D_2 dans laquelle la tension V_d est détectée pour le couple d'électrodes 5.2 et 5.3, et convertie en une grandeur Y_2 ;

- une phase de commande C dans laquelle un signal d'excitation est appliqué soit à l'électrode fixe 5.1 (ici $n.T_s$) soit à l'électrode fixe 5.2 (ici $(n+1).T_s$) selon qu'il est nécessaire d'attirer la masse sismique soit vers l'électrode fixe 5.1 soit vers l'électrode fixe 5.2 pour la ramener vers sa position de consigne.

A l'issue des deux phases de détection, le correcteur 12 détermine le signe de la commande bs qui détermine si le signal de commande u doit être appliqué à l'électrode fixe 5.1 ou à l'électrode fixe 5.2.

Les trois phases D_1 , D_2 et C sont séparées par une phase de relaxation pendant laquelle les interrupteurs I_1 , I_2 , I_3 sont prépositionnés alors que la tension des convertisseurs est à Zéro.

Les phases de détection puis la phase de commande vont maintenant être détaillées.

Durant la phase de détection D_1 dédiée à la mesure de C_h la commande logique s est à 1 de sorte que l'électrode fixe 5.1 est connectée par l'interrupteur I_1

à la sortie v du convertisseur numérique analogique 15 et l'électrode fixe 5.2 est connectée à la masse par l'interrupteur I₂.

La capacité de bouclage de l'amplificateur de charge est préalablement court-circuitée par I₃ (r = 1, réinitialisation de l'amplificateur de charge) alors que la sortie du convertisseur numérique analogique 15 est à zéro.

Après que r soit revenu à zéro, le potentiel v_h est amené par l'action du convertisseur numérique analogique 15 à une valeur constante V_{ref}, ce qui transfère une quantité de charge C_h·V_{ref} dans la capacité C_{ref}.

Lorsque la sortie de l'amplificateur de charge 17 est stabilisée, une première conversion analogique/numérique de v_d est réalisée. Q_{os} étant la quantité de charge injectée, lors de son ouverture, par l'interrupteur analogique I₃ associé à la capacité C_{ref}, v_{os} étant l'offset ramené en entrée du convertisseur numérique analogique 15 et G_{can} étant le gain du convertisseur analogique numérique 19, la sortie du convertisseur analogique numérique 19 en fin de phase D₁ vaut alors :

$$y_1 = G_{can} \cdot \left(-\frac{C_h \cdot V_{ref} + Q_{os}}{C_{ref}} + v_{os} \right)$$

La phase D₂ dédiée à la mesure de C_b est identique à la phase D₁ si ce n'est que les rôles des électrodes 5.1 et 5.2 sont inversés par le fait que s est à 0 et non plus à 1. Il en résulte que la seconde valeur codée par le convertisseur analogique numérique 19 en fin de phase D₂ vaut :

$$y_2 = G_{can} \cdot \left(-\frac{C_b \cdot V_{ref} + Q_{os}}{C_{ref}} + v_{os} \right)$$

C'est grâce à l'emploi d'un convertisseur numérique analogique 15 unique associé aux interrupteurs I₁ et

I_2 que la valeur de V_{ref} est identique dans les expressions des valeurs y_1 et y_2 .

L'opération réalisée par l'estimateur 10 consiste à calculer la différence entre y_1 et y_2 puis à multiplier le résultat par le gain G_{comp} :

$$z_e = G_{comp} \cdot (y_2 - y_1) = G_{comp} \cdot G_{can} \cdot \frac{C_h - C_b}{C_{ref}} \cdot V_{ref}$$

$$G_{comp} = \left(2 \cdot G_{can} \cdot \frac{C_1}{C_{ref}} \cdot \frac{V_{ref}}{e} \right)^{-1}$$

Les biais d'origine électronique (Q_{os} et v_{os}) sont éliminés, de plus l'emploi d'un convertisseur analogique numérique 19 unique donne le même poids aux mesures de C_h et C_b ce qui élimine une autre source de biais.

On notera qu'en remplaçant les capacités par leurs expressions en fonction de z dans l'expression de Z_e ci-dessus, il apparaît que les dissymétries des électrodes sont responsables d'un biais d'estimation z_0 :

$$z_e = \left(2 \cdot \frac{C_1}{e} \right)^{-1} \cdot \left[\sum_{i=0}^{+\infty} (1 + \varepsilon_i) \cdot C_i \cdot \left(\frac{z}{e} \right)^i - (1 - \varepsilon_i) \cdot C_i \cdot \left(-\frac{z}{e} \right)^i \right]$$

$$\approx e \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot \frac{C_0}{C_1} + \frac{z}{e} + \varepsilon_2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot \left(\frac{z}{e} \right)^2 + \frac{C_3}{C_1} \cdot \left(\frac{z}{e} \right)^3 + \varepsilon_4 \cdot \frac{C_4}{C_1} \cdot \left(\frac{z}{e} \right)^4 \right] \approx \underbrace{\varepsilon_0 \cdot \frac{C_0}{C_1}}_{z_0} \cdot e + z$$

En ce qui concerne la phase de commande, la différence $z_m - z_e$ est asservie à zéro par le correcteur 12 qui élabore une commande bs valant +1 ou -1 selon qu'il convient de pousser ou bien de tirer sur le pendule, il en résulte que $s = (bs+1)/2$.

Si $bs = +1$, s est forcé à 1 de sorte que le commutateur 9 connecte la sortie du convertisseur numérique analogique 15 à l'électrode fixe 5.1 et l'électrode fixe 5.2 à la masse. La tension du convertisseur numérique analogique 15 passe alors de zéro à une valeur non nulle puis revient à zéro avant la phase de relaxation. La force électrostatique qui est attractive tire alors le pendule vers l'électrode fixe 5.1.

Si $b_s = -1$, s est forcé à 0 de sorte que le commutateur 9 connecte la sortie du convertisseur numérique analogique 15 à l'électrode fixe 5.2 et l'électrode fixe 5.1 à la masse. La tension du convertisseur numérique analogique 15 passe alors de zéro à une valeur non nulle puis revient à zéro avant la phase de relaxation en décrivant une trajectoire temporelle identique à celle décrite dans le cas où $b_s = +1$. La force électrostatique tire alors le pendule vers l'électrode fixe 5.2.

On note que, de manière analogue à la détection, l'emploi d'un convertisseur numérique analogique 15 unique garantit à nouveau l'égalité des tensions appliquées aux électrodes 5.1, 5.2. Ceci est particulièrement important dans la phase de commande car la force électrostatique appliquée au pendule est égale à la différence des forces électrostatiques appliquées aux électrodes 5.1, 5.2. Or, ces forces étant proportionnelles au carré des tensions appliquées, il faut maîtriser la symétrie des carrés desdites tensions et, contrairement au cas de la détection, cette symétrie doit être obtenue non seulement aux instants d'échantillonnage mais aussi en moyenne sur la période d'échantillonnage. Le convertisseur numérique analogique 15 unique et multiplexé permet d'appliquer des profils de tension identiques aux électrodes 5.1, 5.2 indépendamment des défauts de réalisation de l'électronique. Les instants de commutation des interrupteurs ne sont pas critiques du fait que ceux-ci sont commutés lorsque la tension de sortie du convertisseur numérique analogique 15 est nulle.

Les formes d'onde délivrées par le convertisseur numérique analogique 15 durant les deux phases de détection et la phase de commande sont caractérisées par leurs moyennes quadratiques (ou valeurs RMS) respectives σ_d et σ_c définies sur la durée T_s :

$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} \Sigma \cdot dt = 2 \cdot \sigma_d^2 + \sigma_c^2$$

$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} \Delta \cdot dt = bs \cdot \sigma_c^2$$

avec $\Sigma = V_h^2 + V_b^2$ et $\Delta = V_h^2 - V_b^2$.

Les grandeurs Σ et Δ sont représentatives respectivement de l'action des forces symétriques et l'action des forces dissymétriques agissant sur le pendule. Les grandeurs Σ et Δ sont considérées indépendantes de la position z , ce qui suppose que les électrodes sont pilotées en tension et non en charge.

L'équation d'évolution moyennée sur la période d'échantillonnage devient alors (équation I) :

$$\underbrace{\ddot{z}_m - \ddot{z}_0}_{\approx 0} = \frac{k_e - k}{m} \cdot (z_m - z_0) + \frac{k}{m} \cdot z_c + \underbrace{\frac{C_1 \cdot \sigma_c^2}{2 \cdot m \cdot e} \cdot (\epsilon_1 \cdot \lambda + bs)}_{\text{Accélération électrostatique}} - \gamma$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} k_e = \frac{C_2 \cdot \sigma_c^2}{e^2} \cdot (\lambda + \epsilon_2 \cdot bs) \\ \lambda = 2 \cdot \frac{\sigma_d^2}{\sigma_c^2} + 1 \end{array} \right.$

k_e étant la raideur électrostatique,
 k étant la raideur mécanique,
 z_c étant l'offset mécanique,
 z_0 étant l'offset mécanique.

L'expression de la force électrostatique est donc linéaire vis-à-vis de bs , de plus la raideur électrostatique est désormais constante si bien que l'accélération estimée est calculée comme une fonction affine de bs .

La formule ci-dessus suppose que la dérivée seconde de z_m soit suffisamment proche de zéro pour être négligée, ce qui implique de respecter la condition ci-dessous :

$$\left| \ddot{z}_m \right| \ll \left| -\frac{k}{m} \cdot z_m \right|$$

En pratique cela revient à limiter le spectre de z_m à une bande de fréquence située très en deçà de la première fréquence propre de l'élément sensible.

5 Pour évaluer les erreurs dues aux différents défauts et exposer les moyens d'y remédier, les notions d'accélération maximale et d'accélération de mise en butée sont introduites.

10 Si le capteur et sa mise en œuvre sont dépourvus de défauts, l'accélération maximale γ_{\max} qu'il est possible de compenser est obtenue en remplaçant b_s par 1 dans l'équation I, soit :

$$\gamma_{\max} = \frac{C_1}{2 \cdot m \cdot e} \cdot \sigma_c^2 \rightarrow C_1 = \frac{2 \cdot m \cdot e}{\sigma_c^2} \cdot \gamma_{\max}$$

15 La permittivité électrique de l'entrefer entre les électrodes, la masse volumique, la surface active et l'épaisseur de l'élément sensible sont notées respectivement ϵ , ρ , S et h . Le matériau du pendule étant choisi, on observe que γ_{\max} dépend uniquement de l'épaisseur du pendule et de la moyenne quadratique du champ électrique σ_c/e :

20

$$\left. \begin{array}{l} C_1 \approx \epsilon \cdot \frac{S}{e} \\ m \approx \rho \cdot S \cdot h \end{array} \right\} \rightarrow \gamma_{\max} = \frac{\epsilon}{2 \cdot \rho \cdot h} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{e} \right)^2$$

Par ailleurs, l'accélération γ_0 qui mettrait un pendule idéal en butée en l'absence de force électrostatique vaut :

25
$$\gamma_0 = \frac{k}{m} \cdot e \rightarrow \frac{k}{m} = \frac{\gamma_0}{e}$$

Par substitution dans l'équation I, on met en évidence des erreurs γ_1, γ_2 et γ_3 :

$$\gamma_{\max} \cdot bs = \gamma - \underbrace{\left[\underbrace{2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot (\lambda + \varepsilon_2 \cdot bs) \cdot \gamma_{\max} - \gamma_0}_{\gamma_1} \cdot \frac{z_m - z_0}{e} + \underbrace{\gamma_0 \cdot \frac{z_c}{e}}_{\gamma_2} + \underbrace{\lambda \cdot \gamma_{\max} \cdot \varepsilon_1}_{\gamma_3} \right]}_{\gamma_b} \rightarrow bs = \frac{\gamma - \gamma_b}{\gamma_{\max}}$$

$$k_e = 2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{m}{e} \cdot (\lambda + \varepsilon_2 \cdot bs) \cdot \gamma_{\max}$$

Les biais γ_1 , γ_2 et γ_3 dépendent respectivement de l'offset électrique en détection, des contraintes exercées par la charnière et des dissymétries de force électrostatique. Concernant γ_1 , la part proportionnelle à $bs \cdot \gamma_{\max}$ constitue une erreur de facteur d'échelle de l'accéléromètre. Cependant, cette erreur est généralement négligeable car elle vaut typiquement :

$$2 \cdot \underbrace{\frac{C_2}{C_1}}_{\approx 1} \cdot \underbrace{\varepsilon_2}_{<10^{-3}} \cdot \underbrace{\frac{z_m - z_0}{e}}_{<10^{-3}} < 2\text{ppm}$$

Dans le cas où z_m est nul, la composante du biais due à la détection est obtenue en remplaçant z_0 par sa valeur :

$$\gamma_1(z_m = 0) = \left[2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot (\lambda + \varepsilon_2 \cdot bs) \cdot \gamma_{\max} - \gamma_0 \right] \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{C_0}{C_1}$$

Généralement, le facteur d'échelle γ_{\max} et le biais γ_b sont préalablement identifiés en usine dans une étape de calibration effectuée sur une plage de température cohérente de la plage d'utilisation de l'accéléromètre. Les paramètres de calibration qui diffèrent des paramètres réels du fait des erreurs de modélisation et du vieillissement étant notés avec un accent circonflexe, l'accélération estimée notée γ_e est alors calculée selon la formule :

$$\gamma_e = \hat{\gamma}_b + \hat{\gamma}_{\max} \cdot bs$$

Sachant l'expression de bs en fonction de γ , l'erreur relative de facteur d'échelle ε_{\max} est introduite :

$$\gamma_e = \hat{\gamma}_b + \frac{\hat{\gamma}_{\max}}{\underbrace{\gamma_{\max}}_{1+\varepsilon_{\max}}} \cdot (\gamma - \gamma_b) = \hat{\gamma}_b + (1 + \varepsilon_{\max}) \cdot (\gamma - \gamma_b)$$

5 Pour s'affranchir de l'erreur due à γ_1 , on peut compenser la raideur électrique par la raideur mécanique de sorte que leur différence s'annule, ce qui annule la sensibilité du biais à z_0 :

$$\gamma_1 = \frac{\overset{0}{k_e - k}}{m} \cdot (z_m - z_0) = \underbrace{\left[2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot (\lambda + \varepsilon_2 \cdot bs) \cdot \gamma_{\max} - \gamma_0 \right]}_0 \cdot \frac{z_m - z_0}{e}$$

10 Cependant du fait des dispersions de fabrication du capteur et de l'électronique, la différence des raideurs est imparfaitement annulée, ce qui réduit le bénéfice de l'opération. De plus même si la différence de raideur est parfaitement annulée pour une température de fonctionnement donnée, ce n'est pas le cas pour les autres températures de fonctionnement car les sensibilités thermiques du capteur et de son électronique sont différentes.

15

Le procédé de l'invention permet d'asservir la différence des raideurs mécanique et électrostatique à zéro ce qui annule l'effet du biais en détection.

20 Pour cela, z_m est modulé par le circuit de commande selon un profil temporel prédéterminé mais pas nécessairement cyclique.

La réaction de γ_e à cette perturbation notée $\Delta\gamma_e$ étant proportionnelle à la différence des raideurs, il suffit donc d'annuler cette réaction en ajustant k_e c'est-à-dire λ . Selon que la perturbation est périodique ou pas, la réaction de γ_e à z_m peut être estimée par démodulation synchrone et filtrage, par moindres carrés ou par filtre de Kalman :

25

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_e &= \underbrace{\Delta\dot{\gamma}_b}_0 + \underbrace{\Delta\varepsilon_{\max}}_0 \cdot (\gamma - \gamma_b) + (1 + \varepsilon_{\max}) \cdot \left(\frac{\Delta\gamma}{0} - \Delta\gamma_b \right) = 0 \rightarrow \Delta\gamma_b = 0 \\ &\rightarrow \left[2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot (\lambda + \varepsilon_2 \cdot bs) \cdot \gamma_{\max} - \gamma_0 \right] \cdot \frac{z_m}{e} = 0 \\ &\rightarrow \gamma_b = \underbrace{\gamma_0 \cdot \frac{z_c}{e}}_{\gamma_2} + \underbrace{\lambda \cdot \gamma_{\max} \cdot \varepsilon_1}_{\gamma_3} \end{aligned}$$

L'ajustement de λ (voir l'équation I) est obtenu en réglant σ_d ce qui laisse ε_{\max} invariant. L'ajustement de σ_d peut être obtenu en agissant sur la forme ou la durée de la tension v durant les phases de détection. La seconde solution sera préférée car elle laisse invariant le gain en détection.

La réaction de γ_e à z_m étant annulée par l'annulation de la différence des raideurs $k_e - k$, la réaction de γ_e à z_0 est également annulée et cette source de biais est éradiquée.

L'équilibrage des raideurs présente cependant une limitation de principe. En effet, le choix de l'accélération maximale étant généralement imposé, la condition d'équilibrage conduit à choisir dans ce cas :

$$\gamma_0 = 2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot \lambda \cdot \gamma_{\max} \rightarrow \gamma_b = \lambda \cdot \gamma_{\max} \cdot \left(2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{z_c}{e} + \varepsilon_1 \right)$$

Ceci signifie que la raideur électrique qui est proportionnelle à γ_{\max} , impose une raideur mécanique elle-même proportionnelle à l'accélération maximale à compenser. Cette solution est particulièrement bien adaptée pour les capteurs ayant des entrefers suffisamment grands pour réduire l'effet des déformations responsables de z_c . Cette solution est en outre avantageuse lorsqu'elle est appliquée à un capteur ayant des électrodes à surface variable dont la raideur électrostatique est naturellement voisine de zéro.

L'option d'utiliser une raideur mécanique faible pour réduire le biais dû à celle-ci impose généralement de renoncer à l'appariement des raideurs. Dans ce cas, la

modulation initialement appliquée à z_m n'est pas utilisée mais z_m est ajusté pour compenser z_0 de sorte que :

$$\gamma_1 = \frac{k_e - k}{m} \cdot \underbrace{(z_m - z_0)}_0$$

5 Ceci est obtenu en modulant k_e ou plus exactement λ selon un profil temporel connu mais pas nécessairement reproductible.

La réaction de γ_e à cette perturbation étant sensiblement proportionnelle à $z_m - z_0$, il suffit en principe d'annuler cette réaction en ajustant z_m . Selon que la
10 perturbation est périodique ou pas, la réaction de γ_e à k_e peut être estimée par démodulation synchrone et filtrage, par moindres carrés ou par filtrage de Kalman :

$$\Delta\gamma_b = \left(2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{z_m - z_0}{e} + \varepsilon_1 \right) \cdot \Delta\lambda \cdot \gamma_{\max} = 0 \rightarrow \frac{z_m - z_0}{e} = -\frac{C_1}{2 \cdot C_2} \cdot \varepsilon_1$$

$$\rightarrow \gamma_b = -\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot bs \cdot \gamma_{\max} + \left(\frac{C_1}{2 \cdot C_2} \cdot \varepsilon_1 + \frac{z_c}{e} \right) \cdot \gamma_0$$

15 Comme l'indique la relation ci-dessus, plutôt que de s'annuler, la quantité $z_m - z_0$ s'ajuste en fonction de ε_1 .

La modulation de λ est obtenue en réglant σ_d ce qui laisse ε_{\max} invariant. L'ajustement de σ_d peut être obtenu en agissant sur la forme ou la durée de la tension v durant
20 les phases de détection. La seconde solution sera préférée car elle laisse invariant le gain en détection.

Il est à noter que l'asservissement d'offset pénalise les capteurs ayant des électrodes à surfaces variables car le rapport C_1/C_2 naturellement grand dégrade
25 le biais.

Dans le deuxième mode de réalisation des figures 2 et 3, le circuit d'excitation 6 est dépourvu de convertisseur numérique analogique 15 et comprend à la place un générateur de tension 30 relié via un interrupteur 31 à
30 une entrée d'un étage amplificateur comportant une résis-

tance d'entrée 32 reliée à un amplificateur 33 bouclé par un condensateur de filtrage 34 et d'une résistance 35.

Ceci permet de réduire le coût et la puissance dissipée du circuit d'excitation en supprimant le convertisseur numérique analogique.

La commande u valant 0 ou 1 pilote l'interrupteur 31. Ce dernier connecte la résistance 32 soit sur le générateur 30 de tension constante de référence **Ref** soit à la masse. La tension appliquée à la résistance 32 est amplifiée dans le rapport des valeurs des résistances 32, 35 (soit $-R_2/R_1$) et filtrée avec une constante de temps R_2C (C étant la capacité du condensateur 34) qui prévient la saturation transitoire de l'amplificateur de charge 33 liée au dépassement de sa vitesse de balayage (dite slew-rate). Cette constante de temps doit cependant être choisie suffisamment petite devant T_s pour que la tension de sortie de l'amplificateur de charge 33 soit revenue à une valeur proche de zéro lors des commutations de I_1 à I_2 .

Pour réduire l'impact de la quantification du convertisseur numérique sur le bruit d'estimation de l'accélération, le circuit de la figure 3 peut être utilisé.

L'étage amplificateur principal 16 du circuit de détection 7 est relié au convertisseur numérique 19 par l'intermédiaire d'un étage compensateur, généralement désigné en 40, comportant une première résistance 41 et une deuxième résistance 42 reliées en série entre la sortie de l'étage amplificateur principal 16 et l'entrée du convertisseur numérique 19. L'étage compensateur 40 comporte un amplificateur additionnel 43 et un interrupteur 44 montés respectivement en parallèle de la deuxième résistance 42, et un convertisseur numérique analogique 45 relié via une troisième résistance 46 à la deuxième résistance 42, à l'amplificateur additionnel 43 et à l'interrupteur 44.

L'interrupteur 44 et le convertisseur numérique analogique 45 sont pilotés par le circuit de commande 8.

Ceci permet de réduire le bruit basse fréquence dû à la quantification du convertisseur analogique numérique 19.

Le gain R_2/R_1 qui tient lieu de zoom dans l'étage de compensation est fixé à une valeur très supérieure à l'unité. L'ouverture de l'interrupteur 44 a lieu pendant les phases D_1 et D_2 quand la sortie de l'amplificateur de charge 43 est stabilisée. Le convertisseur numérique analogique 45 est piloté par le circuit de commande 8 de sorte à maintenir la somme y_1+y_2 au voisinage de zéro, la dynamique du convertisseur numérique analogique peut être exploitée pour coder uniquement les variations de capacités amplifiées par le rapport R_2/R_1 .

Le convertisseur numérique analogique 45 compense les effets de :

- La partie fixe des capacités.
- L'offset v_{os} .
- L'injection de charge Q_{os} .

Ces effets sont lentement variables, ce qui permet d'utiliser un convertisseur numérique analogique 45 lent et peu bruyant afin de réduire simultanément le coût et la puissance dissipée.

Au voisinage de la fréquence de coupure de la boucle sigma delta, la fonction de transfert en boucle ouverte doit tendre vers celle d'un intégrateur afin d'assurer un bon amortissement. Or, le comportement du pendule étant dominé en haute fréquence par les forces d'inerties, la fonction de transfert z/bs est assimilable à celle d'un double intégrateur. La fonction de transfert du correcteur doit donc tendre vers celle d'un dérivateur.

En cas d'utilisation d'un zoom, la saturation électrique de la détection précède la saturation méca-

que liée à la mise butée du pendule. Lorsque la saturation électrique est atteinte, la fonction dérivateur normalement remplie par le correcteur ne peut plus être remplie et la boucle peut entrer dans un cycle limite dont l'issue ne peut généralement pas être garantie.

Pour contourner cette difficulté, il est souhaitable que le convertisseur analogique numérique 19 puisse au besoin mesurer non seulement la sortie du zoom mais également son entrée. Cela requiert simplement l'emploi d'un multiplexeur 2 vers 1 ainsi qu'une stratégie de contrôle adaptée.

Dans une configuration particulière du capteur selon le premier ou le deuxième mode de réalisation, le capteur comprend deux accéléromètres pendulaires électrostatiques qui sont pourvus chacun d'un circuit d'excitation et d'un circuit de détection et qui ont un axe sensible commun.

Les deux méthodes permettant d'annuler l'effet de l'offset en détection sont basées sur l'exploitation de la réaction de γ_e à une perturbation connue. Si l'accélération appliquée au capteur présente des corrélations apparentes avec le signal de modulation, il en résultera une correction partiellement erronée de l'accélération estimée. L'emploi d'un filtre de Kalman peut réduire la sensibilité à ce type d'erreur mais pas l'annuler.

Si par exemple l'accéléromètre est soumis à un bruit blanc en accélération ayant une valeur efficace de $10g_{\text{rms}}$ sur une bande de fréquence allant de 0 à 10kHz et si la boucle d'asservissement de $\Delta\gamma$ est réglée avec une bande passante de 0,01Hz, il en résultera une erreur de compensation de $10 \text{ mg}_{\text{rms}}$ inacceptable pour certaines applications comme la navigation.

Cette difficulté peut être contournée grâce à l'emploi de 2 accéléromètres identiques à celui décrit

ci-dessus dont les axes sensibles sont confondus. Il suffit alors d'appliquer la modulation de z_m ou de λ à l'un des deux accéléromètres seulement et à asservir à zéro la réaction de la différence des $\Delta\gamma$. Dans ce cas, l'effet de l'accélération appliquée est annulé aux dissymétries de gain et de calage d'axe près des deux accéléromètres.

Le gain des deux accéléromètres étant calibré, la différence des gains est inférieure à 100ppm, ce qui réduit l'erreur de 10mg_{rms} à $1\mu\text{g}_{\text{rms}}$. Cependant, l'accélération appliquée se manifeste encore à travers les différences de calage d'axe brutes qui sont inférieures à 10mrad. Cette limitation autorise néanmoins une réduction par 100 qui défaut initial qui passe de 10mg_{rms} à $100\mu\text{g}_{\text{rms}}$, valeur acceptable pour un système de navigation performant.

La modulation peut avantageusement être appliquée à l'un puis à l'autre des deux accéléromètres de sorte à obtenir une information redondante et précise à la fois. Plus généralement, il suffira d'utiliser pour les deux accéléromètres des signaux de modulation décorrélés entre eux. Un accéléromètre composite tel que celui-ci est dit accéléromètre double.

Si les limitations liées au calage d'axe sont jugées préjudiciables, il est possible de réduire encore leur influence en combinant les estimations et les modulations de 3 accéléromètres doubles dont les axes sensibles ont des directions indépendantes de préférence orthogonales entre elles.

Le défaut lié aux différences de calages d'axes brutes est alors réduit au résidu de modélisation et au vieillissement de ce dernier grâce à une calibration usine qui permet d'identifier la matrice de compensation ci-dessous :

$$\vec{\gamma}_{e,\text{cor}} = \mathbf{M} \cdot \vec{\gamma}_e$$

Le vecteur $\vec{\gamma}_e$ est un vecteur 6x1 constitués des 6 informations issues des 6 accéléromètres, la matrice M est une matrice 6x6 qui corrige les erreurs de gain et de calage d'axe des 6 accéléromètres. Le vecteur $\vec{\gamma}_{e,cor}$ est un
5 vecteur 6x1 constitué des 6 informations d'accélération corrigées redondantes deux à deux.

L'exploitation de $\vec{\gamma}_{e,cor}$ associée à l'emploi de 6 modulations décorrélées entre elles permet de réduire le poids des erreurs de gain et de calage d'axe à moins de
10 100ppm, ce qui porte le défaut résiduel à moins d' $1\mu g_{rms}$.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits mais englobe toute variante entrant dans le champ de l'invention telle que définie par les revendications.

15 En particulier, l'électronique du capteur peut avoir une structure différente de celles décrites. Par exemple, le circuit d'excitation du premier mode de réalisation peut être utilisé avec le circuit de détection du deuxième mode de réalisation et le circuit de détec-
20 tion du premier mode de réalisation peut être utilisé avec le circuit d'excitation du deuxième mode de réalisation.

En outre, l'invention est applicable à tout type d'accéléromètre pendulaire électrostatique. Ainsi, la mécanique du capteur peut avoir une structure différente de
25 celle décrite. Par exemple, la masse sismique peut être reliée au boîtier par un nombre différent de charnières, disposées pour permettre un pivotement ou un coulissement de la masse sismique par rapport au boîtier.

30 Dans le cas où le capteur comprend deux accéléromètres pendulaires électrostatiques, il est possible de ne prévoir qu'un seul circuit d'excitation pour les deux accéléromètres.

On notera qu'il peut être avantageux d'inverser
35 l'ordre des phases de détection D1 et D2 à chaque période

d'échantillonnage, afin de symétriser les mesures effectuées sur chaque couple d'électrodes.

REVENDICATIONS

1. Procédé de commande d'un capteur comprenant au moins un accéléromètre pendulaire électrostatique ayant une première électrode et une deuxième électrode fixes qui sont
5 fixées à un boîtier et qui sont reliées à un circuit d'excitation et une troisième électrode qui est portée par un pendule relié au boîtier pour être mobile et qui est reliée à un circuit de détection, comprenant les étapes de :
- 10 - lors de deux phases successives de détection, exciter alternativement l'une et l'autre des électrodes fixes par des impulsions de détection pour détecter une première capacité et une deuxième capacité entre l'électrode mobile et les électrodes fixes,
- 15 - estimer une position du pendule à partir des capacités détectées,
- déterminer une erreur d'asservissement correspondant à une différence entre la position estimée et une position de consigne,
- 20 - à partir de l'erreur d'asservissement, déterminer une commande déterminant si la prochaine impulsion de détection va pousser ou tirer le pendule,
- calculer l'accélération à mesurer en fonction de la position de consigne et de la commande déterminée,
- 25 - lors d'une phase de commande, exciter l'une ou l'autre des électrodes fixes par des impulsions de commande pour asservir à zéro l'erreur d'asservissement.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la position de consigne est modulée selon un profil temporel
30 déterminé de telle manière qu'une réaction à la commande déterminée soit proportionnelle à une différence entre une raideur électrostatique et une raideur mécanique entre le pendule et le boîtier.
3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel la
35 réaction à la commande à ladite modulation est annulée en ajustant la forme ou la durée des impulsions de détection

pour que la raideur électrostatique compense la raideur mécanique.

4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la position de consigne est ajustée pour compenser un biais d'estimation de position.

5. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les étapes sont répétées selon des périodes, les phases de détection des première et deuxième capacités étant inversées d'une période à l'autre.

6. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les étapes sont séparées par des phases de relaxation durant lesquelles le commutateur est positionné lorsque la tension du circuit d'excitation est nulle.

7. Capteur accélérométrique pour la mise en œuvre du procédé selon la revendication 1, comprenant au moins un accéléromètre pendulaire électrostatique ayant une première électrode et une deuxième électrode fixes qui sont fixées à un boîtier et qui sont reliées à un circuit d'excitation et une troisième électrode qui est portée par un pendule relié au boîtier pour être mobile et qui est reliée à un circuit de détection, caractérisé en ce que le circuit d'excitation a une sortie raccordée à un commutateur relié aux première et deuxième électrodes, le commutateur ayant une première position de connexion et une deuxième position de connexion pour raccorder sélectivement au circuit d'excitation la première électrode et la deuxième électrode, et en ce que le circuit d'excitation, le commutateur et le circuit de détection sont reliés à un circuit de commande agencé pour que les première et deuxième électrodes soient excitées par des train d'impulsions de manière à maintenir le pendule dans une position de consigne et à déterminer une accélération subie par le pendule.

8. Capteur selon la revendication 7, dans lequel le circuit d'excitation comprend un convertisseur numérique analogique raccordé au commutateur et piloté par le circuit de commande.

9. Capteur selon la revendication 7, dans lequel le circuit d'excitation comprend un générateur de tension constante relié via un interrupteur à une entrée d'un étage amplificateur/filtre ayant une sortie formant la sortie du circuit d'excitation.

10. Capteur selon la revendication 7, dans lequel le circuit de détection comprend un étage amplificateur principal ayant une entrée reliée à la troisième électrode et une sortie reliée à une entrée d'un unique convertisseur analogique numérique ayant une sortie reliée à l'unité de commande.

11. Capteur selon la revendication 10, dans lequel l'étage amplificateur principal est relié au convertisseur analogique numérique par l'intermédiaire d'un étage compensateur comportant une première résistance et une deuxième résistance reliées en série entre la sortie de l'étage amplificateur principal et l'entrée du convertisseur analogique numérique, l'étage compensateur comportant un amplificateur additionnel et un interrupteur montés respectivement en parallèle de la deuxième résistance, et un convertisseur numérique analogique relié à la deuxième résistance, à l'amplificateur additionnel et à l'interrupteur, l'interrupteur et l'amplificateur additionnel étant reliés au circuit de commande.

12. Capteur selon la revendication 7, dans lequel le circuit de commande est agencé pour changer la position du commutateur lorsque la tension en sortie du circuit d'excitation est nulle.

13. Capteur selon la revendication 7, dans lequel le circuit de commande comporte un premier estimateur (10) de position du pendule ayant une entrée reliée au circuit de détection (7) et une sortie reliée à une entrée négative d'un sommateur (11) ayant une sortie reliée à une entrée d'un correcteur (12) ayant une sortie reliée à un séquenceur (13) et à un deuxième estimateur (14) ayant une sortie reliée à l'entrée additive du sommateur (11) et une pre-

mière sortie fournissant une estimée de l'accélération et une deuxième sortie reliée à l'entrée positive du sommateur pour fournir à celui-ci une position modulée, le correcteur étant agencé pour déterminer une impulsion et le séquenceur
5 étant agencé pour commander le circuit d'excitation, le commutateur et le circuit de détection.

14. Capteur selon la revendication 7, comprenant au moins deux accéléromètres pendulaires électrostatiques qui sont pourvus chacun d'un circuit d'excitation et d'un cir-
10 cuit de détection et qui ont un axe sensible commun.

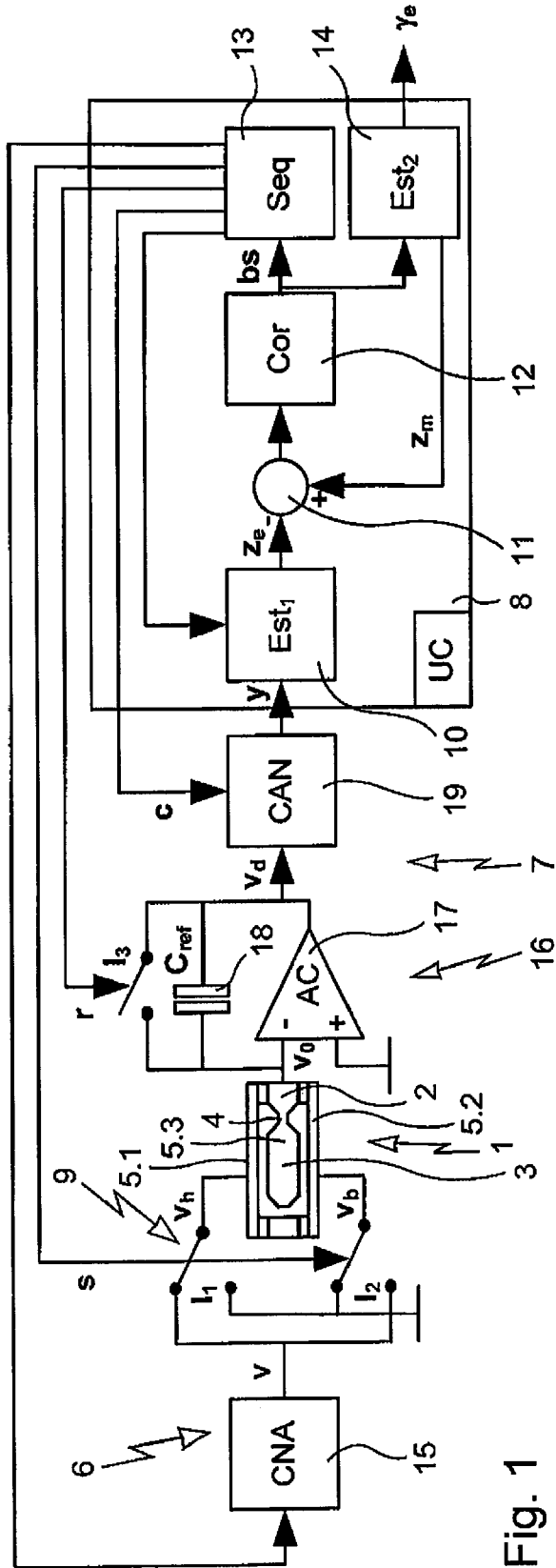


Fig. 1

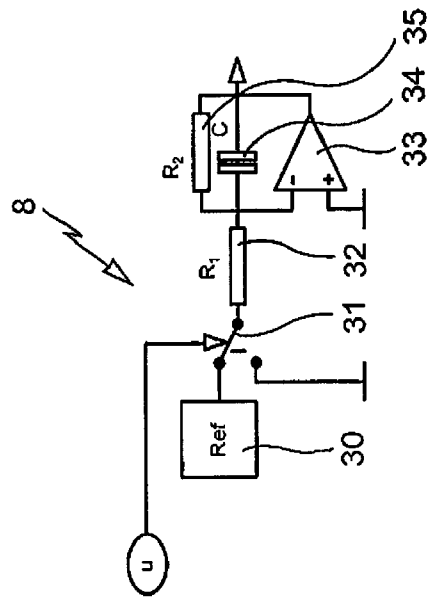


Fig. 2

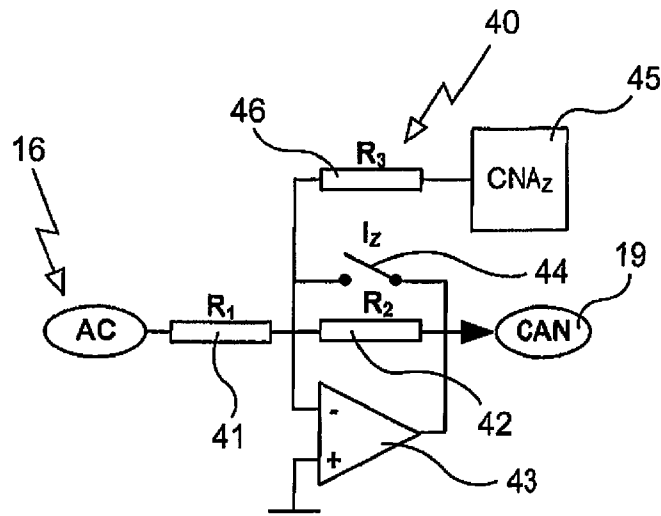


Fig. 3

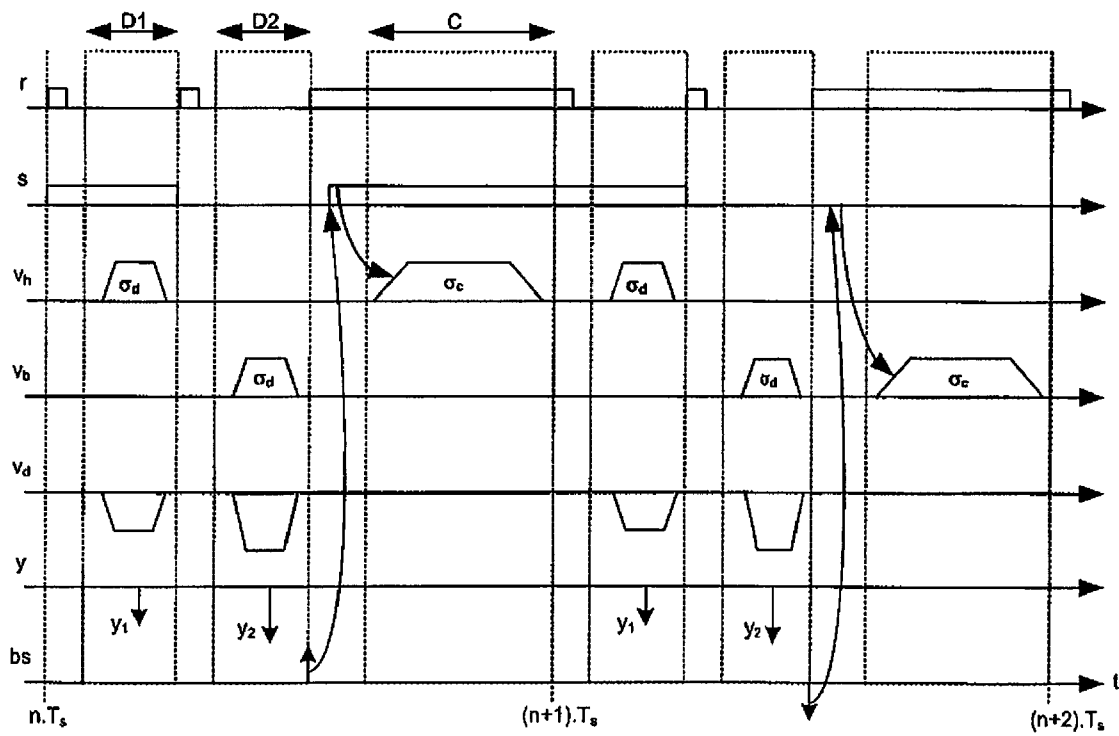


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/052652

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01P15/13 G01P15/08
ADD.
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)
G01P
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.
A	US 5 812 427 A (NONOYAMA SHIGERU [JP] ET AL) 22 September 1998 (1998-09-22) column 2, line 32 - line 62 column 4, line 10 - line 36 column 5, line 5 - column 6, line 13 column 8, line 3 - line 8 column 8, line 64 - column 9, line 39 column 10, line 47 - column 11, line 7 figure 1	1,7
A	----- US 6 301 965 B1 (CHU DAHLON D [US] ET AL) 16 October 2001 (2001-10-16) column 4, line 32 - line 59 column 5, line 36 - line 43 column 7, line 33 - line 50 column 8, line 61 - column 9, line 10 figure 1 ----- -/--	1,7

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	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"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
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 10 March 2014	Date of mailing of the international search report 18/03/2014
--	--

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 Robinson, Mark
--	--------------------------------------

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/052652

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2010/046368 A1 (E2V SEMICONDUCTORS [FR]; MASSON THIERRY [FR]; DEBROUX JEAN-FRANCOIS [F]) 29 April 2010 (2010-04-29) page 6, line 29 - page 8, line 6 page 12, line 7 - line 9 figure 1 -----	1,7
A	US 2008/295597 A1 (STEWART ROBERT E [US] ET AL) 4 December 2008 (2008-12-04) paragraph [0018] - paragraph [0022] paragraph [0028] - paragraph [0029] figure 1 -----	1,7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2014/052652

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5812427	A	22-09-1998	DE 19616412 A1 31-10-1996
			JP 3322067 B2 09-09-2002
			JP H08292206 A 05-11-1996
			US 5812427 A 22-09-1998

US 6301965	B1	16-10-2001	NONE

WO 2010046368	A1	29-04-2010	FR 2937742 A1 30-04-2010
			WO 2010046368 A1 29-04-2010

US 2008295597	A1	04-12-2008	DE 102008025387 A1 22-01-2009
			FR 2916855 A1 05-12-2008
			JP 4750825 B2 17-08-2011
			JP 2008298775 A 11-12-2008
			US 2008295597 A1 04-12-2008

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2014/052652

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01P15/13 G01P15/08 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) G01P		
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
A	US 5 812 427 A (NONOYAMA SHIGERU [JP] ET AL) 22 septembre 1998 (1998-09-22) colonne 2, ligne 32 - ligne 62 colonne 4, ligne 10 - ligne 36 colonne 5, ligne 5 - colonne 6, ligne 13 colonne 8, ligne 3 - ligne 8 colonne 8, ligne 64 - colonne 9, ligne 39 colonne 10, ligne 47 - colonne 11, ligne 7 figure 1	1,7
A	----- US 6 301 965 B1 (CHU DAHLON D [US] ET AL) 16 octobre 2001 (2001-10-16) colonne 4, ligne 32 - ligne 59 colonne 5, ligne 36 - ligne 43 colonne 7, ligne 33 - ligne 50 colonne 8, ligne 61 - colonne 9, ligne 10 figure 1 ----- -/--	1,7
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents		
<input checked="" type="checkbox"/> 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 10 mars 2014		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 18/03/2014
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 Robinson, Mark

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>WO 2010/046368 A1 (E2V SEMICONDUCTORS [FR]; MASSON THIERRY [FR]; DEBROUX JEAN-FRANCOIS [F]) 29 avril 2010 (2010-04-29) page 6, ligne 29 - page 8, ligne 6 page 12, ligne 7 - ligne 9 figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1,7
A	<p>US 2008/295597 A1 (STEWART ROBERT E [US] ET AL) 4 décembre 2008 (2008-12-04) alinéa [0018] - alinéa [0022] alinéa [0028] - alinéa [0029] figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1,7

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2014/052652

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5812427	A	22-09-1998	DE 19616412 A1	31-10-1996
			JP 3322067 B2	09-09-2002
			JP H08292206 A	05-11-1996
			US 5812427 A	22-09-1998

US 6301965	B1	16-10-2001	AUCUN	

WO 2010046368	A1	29-04-2010	FR 2937742 A1	30-04-2010
			WO 2010046368 A1	29-04-2010

US 2008295597	A1	04-12-2008	DE 102008025387 A1	22-01-2009
			FR 2916855 A1	05-12-2008
			JP 4750825 B2	17-08-2011
			JP 2008298775 A	11-12-2008
			US 2008295597 A1	04-12-2008
