

(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
16 avril 2015 (16.04.2015)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/052252 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G02B 5/28 (2006.01) *G01J 3/26* (2006.01)
G02B 26/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2014/071570

(22) Date de dépôt international :
8 octobre 2014 (08.10.2014)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1359755 8 octobre 2013 (08.10.2013) FR

(71) Déposant : SAGEM DEFENSE SECURITE [FR/FR];
18-20 Quai du Point du Jour, F-92100 Boulogne-Billancourt (FR).

(72) Inventeur : 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, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Publiée :

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

(54) Title : OPTICAL INTERFEROMETER COMPRISING A STATIONARY MIRROR AND A DYNAMICALLY USABLE MOVABLE MIRROR, AND METHOD FOR CONTROLLING THE SPACING SEPARATING THE MIRRORS OF THE INTERFEROMETER

(54) Titre : INTERFEROMETRE OPTIQUE AVEC UN MIROIR FIXE ET UN MIROIR MOBILE ET UTILISABLE DYNAMIQUEMENT, ET PROCEDE D'ASSERVISSEMENT DE L'ECARTEMENT DES MIROIRS DE L'INTERFEROMETRE

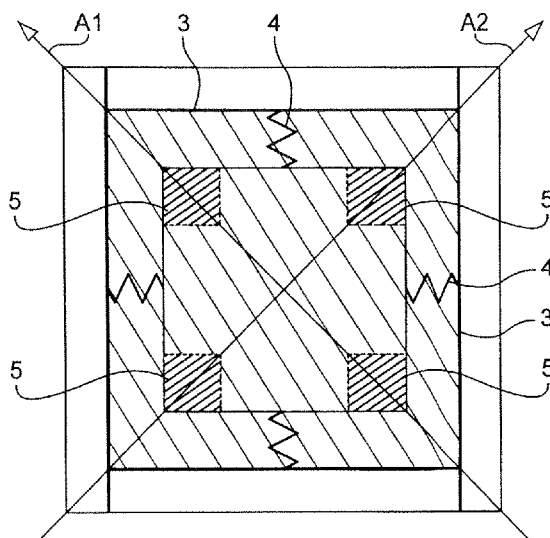


Fig. 1

(57) Abstract : Interferometer comprising a holder on which a stationary mirror (1) and a movable mirror (2) are mounted parallel to each other, and means for adjusting a spacing separating the mirrors from each other, characterized in that the movable mirror is connected to the holder by elastic suspending means (4) and in that the means for adjusting the spacing separating the mirrors comprise at least three pairs of facing electrodes (5) that are connected to a control unit arranged to supply the electrodes so that they form electrostatic actuators and detectors and keep the movable mirror in position by placing the suspending means under stress. Method for adjusting such an interferometer.

(57) Abrégé : Interféromètre comportant un support sur lequel sont monté un miroir fixe (1) et un miroir mobile (2) s'étendant parallèlement l'un à l'autre, et des moyens de réglage d'un écartement des miroirs l'un par rapport à l'autre, caractérisé en ce que le miroir mobile est relié au

[Suite sur la page suivante]



support par des moyens de suspension élastique (4) et en ce que les moyens de réglage de l'écartement des miroirs comportent au moins trois paires d'électrodes (5) en regard qui sont reliées à une unité de commande agencée pour alimenter les électrodes de manière qu'elles forment des actionneurs et des détecteurs électrostatiques pour maintenir en position le miroir mobile en mettant sous contrainte les moyens de suspensions. Procédé de réglage d'un tel interféromètre.

**INTERFEROMETRE OPTIQUE AVEC UN MIROIR FIXE ET UN MIROIR MOBILE
ET UTILISABLE DYNAMIQUEMENT, ET PROCEDE D'ASSERVISSEMENT DE
L'ECARTEMENT DES MIROIRS DE L'INTERFEROMETRE**

La présente invention concerne un interféromètre
optique utilisable dynamiquement et un procédé
5 d'asservissement d'un tel interféromètre.

Un interféromètre de Fabry-Pérot comprend deux
lames (communément appelées miroirs) ayant des faces
planes partiellement réfléchissantes s'étendant en regard
l'une de l'autre et des faces opposées traitées antire-
10 flet. Les miroirs sont montés dans un support pour
s'étendre parallèlement l'un à l'autre en maintenant un
écartement entre eux. Une cavité est ainsi ménagée entre
les deux miroirs de telle manière que, lorsqu'un flux lu-
mineux traverse cette cavité, il va subir de multiples
15 réflexions sur les miroirs. A chaque rencontre du flux
lumineux avec un des miroirs, une partie du flux lumineux
est réfléchi par le miroir et une partie du flux lumi-
neux traverse le miroir donnant naissance à une figure
d'interférences à ondes multiples qui est constituée
20 d'anneaux concentriques. Les interféromètres de Fabry-
Pérot sont utilisés par exemple pour la séparation ou le
filtrage des longueurs d'ondes de flux lumineux en ex-
ploitant la partie du flux lumineux traversant le miroir.

Les caractéristiques de l'interféromètre de Fa-
25 bry-Pérot dépendent de l'écartement et du parallélisme
des miroirs, ainsi que de leur coefficient de réflexion.
L'écartement des miroirs et l'angle d'incidence du flux
lumineux déterminent la fréquence de résonance de
l'interféromètre. Le coefficient de réflexion détermine
30 sa finesse. Le parallélisme des miroirs a une incidence
importante sur les performances de l'interféromètre.

Il est connu de prérégler l'écartement des mi-
roirs afin de pouvoir utiliser l'interféromètre sur une
plage de fréquences de résonance prédéterminée. L'un des
35 miroirs est à cette fin monté mobile sur le support qui

est pourvu de vis micrométriques agencées pour entraîner le miroir mobile par rapport au miroir fixe et permettre ainsi de faire varier l'écartement des miroirs.

Il peut être intéressant d'utiliser l'interféromètre de façon dynamique, par exemple pour explorer spectralement une image en temps réel. Il est alors nécessaire de faire varier rapidement la longueur d'onde d'analyse : le réglage fin du parallélisme de l'interféromètre est alors extrêmement complexe, si ce n'est impossible, de sorte qu'on cherche à déplacer les miroirs tout en conservant leur parallélisme. A cette fin, l'un des miroirs est généralement monté sur un support de guidage extrêmement précis, relativement coûteux, encombrant et à performances dynamiques faibles.

Il est en outre connu d'utiliser plusieurs interféromètres logés dans une même optique et accordés sur des fréquences différentes. Cette solution est cependant coûteuse, encombrante et présente une résolution relativement faible.

Un but de l'invention est de fournir un moyen pour faciliter l'utilisation dynamique des interféromètres de type Fabry-Pérot.

A cet effet, on prévoit, selon l'invention, un interféromètre comportant un support sur lequel sont monté un miroir fixe et un miroir mobile s'étendant parallèlement l'un à l'autre, et des moyens d'asservissement d'un écartement des miroirs l'un par rapport à l'autre. Le miroir mobile est relié au support par des moyens de suspension élastique. Les moyens d'asservissement comportent au moins trois paires d'électrodes en regard qui sont reliées à une unité de commande agencée pour alimenter les électrodes de manière qu'elles forment des actionneurs et des détecteurs électrostatiques pour maintenir en position le miroir mobile en mettant sous contrainte les moyens de suspension.

Ainsi, il est possible de détecter l'entrefer entre électrodes et donc l'écartement entre les miroirs et de modifier cet écartement en pilotant les électrodes de manière qu'elles engendrent une force électrostatique déplaçant le miroir mobile en mettant sous contrainte les
5 moyens de suspension. Le miroir mobile est alors maintenu dans une position déterminée par l'équilibre entre la force électrostatique et la force de rappel élastique engendrée par les moyens de suspension. Lorsque le miroir
10 mobile est soumis à des forces extérieures, la force électrostatique est déterminée pour compenser également ces forces si nécessaire.

L'invention a également pour objet un procédé de commande de transducteurs électrostatiques d'ajustement de position d'un miroir mobile par rapport à un miroir
15 mobile d'un interféromètre optique, le miroir mobile étant relié par des moyens de suspension élastique à un support dont est solidaire le miroir fixe, le procédé comprenant les étapes de :

- 20 - déterminer un entrefer de chaque transducteur par une mesure capacitive,
- estimer un écartement des miroirs en calculant une moyenne des entrefers déterminés,
- déterminer et appliquer une tension de commande
25 pour chaque transducteur pour engendrer une force électrostatique mettant sous contrainte les moyens de suspensions de manière à modifier l'écartement estimé en maintenant les miroirs parallèles l'un à l'autre.

Ce procédé permet de piloter la fréquence de résonance de l'interféromètre.
30

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description qui suit d'un mode de mise en œuvre particulier non limitatif de l'invention.

35 Il sera fait référence aux dessins annexés, parmi

lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique de dessous d'un interféromètre conforme à l'invention ;
- la figure 2 est une vue schématique de profil
5 de cet interféromètre ;
- la figure 3 est un schéma du circuit électronique des moyens de réglage de l'écartement des miroirs ;
- la figure 4 est un chronogramme montrant les
10 cycles de commande et détection ;
- la figure 5 est un chronogramme détaillant le cycle de détection ;
- la figure 6 est une vue schématique d'une machine virtuelle équivalente aux moyens de réglage de l'écartement des miroirs.
15

En référence aux figures, l'interféromètre de l'invention est un interféromètre de type Fabry-Pérot comprenant deux dioptrés ou miroirs 1, 2 qui, de façon connue en elle-même, sont partiellement réfléchissants et
20 présentent un coefficient de réflexion relativement élevé. Les miroirs 1, 2 sont montés dans un support 3 pour s'étendre parallèlement l'un à l'autre. Le miroir 1 est fixe par rapport au support 3. Le miroir 2 est mobile par rapport au support 3 et est relié au support 3 par des
25 moyens de suspension élastique 4 essentiellement caractérisée par leur raideur mécanique K. Les miroirs 1 et 2 sont espacés d'une distance e qui est réglée mécaniquement mais qui peut être légèrement modifiée de façon dynamique, comme cela sera décrit plus loin, de manière à
30 permettre une variation de la fréquence de résonance de l'interféromètre.

Les miroirs 1, 2 sont pourvus d'au moins trois, ici quatre, paires 5 d'électrodes en regard l'une de l'autre. Les électrodes de chaque paire d'électrodes 5

sont formées d'une couche métallique déposée directement sur le miroir 1 et sur le miroir 2 respectivement.

Une des électrodes de chacune des quatre paires d'électrodes 5 est reliée à un convertisseur numérique/analogique 21, 1 bit, et l'autre des électrodes est reliée à une entrée d'un amplificateur de charge 22. Il y a un convertisseur numérique/analogique 21 par paire d'électrodes 5. L'amplificateur de charge 22 est lui commun à toutes les paires d'électrodes 5.

Un condensateur C_{ref} est monté en parallèle des paires d'électrodes 5. Le condensateur C_{ref} a une électrode reliée à un cinquième convertisseur numérique/analogique 21, 1 bit, et une électrode reliée à l'entrée de l'amplificateur de charge 22. Le condensateur C_{ref} permet de calibrer et/ou compenser en temps réel les erreurs de gain dues à l'électronique afin de réduire les instabilités relatives de l'entrefer électrique aux seules instabilités relatives du condensateur C_{ref} .

Chaque convertisseur numérique/analogique 21 est réalisé à l'aide d'interrupteurs analogiques permettant l'application soit d'une tension nulle soit d'une tension de référence commune V_{ref} en fonction d'une commande E provenant de l'unité de commande 10 (la tension de sortie des convertisseurs numérique/analogique est notée V sur la figure 3, avec un indice 1 à 4 pour chacune des paires d'électrodes 5 et avec un indice 5 pour la capacité C_{ref}).

L'amplificateur de charge 22 est bouclé par un condensateur C_b et mesure les variations de charge provoquées par les tensions V_1 à V_5 .

L'amplificateur de charge 22 a une sortie (fournissant un signal y_1) reliée à un filtre 23 (fournissant un signal y_2), qui est un filtre anti-repliement qui réduit la bande passante des signaux avant leur numérisation par un convertisseur analogique/numérique 24 (fournissant un signal y).

Les convertisseurs numérique/analogique 21 et le convertisseur analogique/numérique 24 sont reliés à une unité de commande 10 agencée pour piloter les électrodes de manière qu'elles forment quatre transducteurs électrostatiques constituant alternativement :

- des détecteurs électrostatiques pour estimer l'entrefer, et donc l'écartement e , et ses anisotropies à travers la mesure des capacités au niveau de chaque paire d'électrodes 5 ;

- des actionneurs électrostatiques pour commander l'ajustement de l'entrefer, et donc l'écartement e , par application de quatre tensions de contrôle.

Les paires 5 d'électrodes en regard reliées à l'unité de commande 10 forment donc des actionneurs et des détecteurs électrostatiques constituant des moyens d'ajustement de la position du miroir mobile 2 par rapport au miroir fixe 1, et constituant donc des moyens d'ajustement de l'écartement e des miroirs 1, 2, en mettant sous contrainte les moyens de suspensions 4.

Les transducteurs électrostatiques formés par les paires 5 d'électrodes en regard sont caractérisés par leurs surfaces et entrefers respectifs s_i et e_i et sont assimilés à des condensateurs plans de valeur :

$$C_i = \epsilon \cdot \frac{s_i}{e_i}$$

où ϵ désigne la permittivité diélectrique du gaz séparant les miroirs 1, 2.

Le procédé de l'invention consiste à contrôler l'écartement e des miroirs 1, 2 qui définit la fréquence de résonance de l'interféromètre optique en réduisant au minimum les défauts de parallélisme altérant la qualité de l'interféromètre.

Pour assurer le parallélisme entre deux plans, il suffit de disposer de trois transducteurs assurant simul-

tanément ou séquentiellement les fonctions de détecteurs et d'actionneurs.

Le mode de réalisation présenté ici utilise avantageusement quatre transducteurs au lieu de trois afin de
5 bénéficier de propriétés de symétrie favorables à la réduction des anisotropies de gain entre transducteurs.

Ainsi, la mesure des capacités des quatre transducteurs fournit une information redondante qui permet l'estimation des trois grandeurs d'intérêt, à savoir :

10 - l'entrefer moyen, égal à l'écartement e , obtenu en calculant une moyenne des entrefers des paires d'électrodes 5,

- le roulis (ou le degré de rotation du miroir 2 autour d'un axe prédéterminé A1 qu'on appelle ici axe de
15 roulis),

- le tangage (ou le degré de rotation du miroir 2 autour d'un axe prédéterminé A2 qu'on appelle ici axe de tangage).

Les paires d'électrodes 5 sont ici disposées aux
20 sommets d'un carré et les axes A1 et A2 s'étendent selon les diagonales de ce carré de sorte que deux paires d'électrode 5 se trouvent sur l'axe A1 et deux paires d'électrodes 5 se trouvent sur l'axe A2. Le roulis sera donc égal à la différence entre les entrefers des paires
25 d'électrodes 5 se trouvant sur l'axe A2 et le tangage sera égal à la différence entre les entrefers des paires d'électrodes 5 se trouvant sur l'axe A1.

Accessoirement, la redondance peut être mise à profit pour estimer partiellement la courbure du miroir
30 mobile 2, le miroir fixe 1 étant lui supposé plan.

L'application de quatre tensions de contrôle adéquates appliquées aux quatre transducteurs engendre une force électrostatique permettant le réglage des trois grandeurs d'intérêt. La force électrostatique, qui est
35 uniquement attractive, doit être suffisante pour mettre

sous contrainte les moyens de suspension 4 de sorte à pouvoir contrer l'effet des accélérations et forces gravitationnelles appliquées au dispositif quelle que soit la direction de celles ci.

5 Enfin, pour réduire au minimum les anisotropies de gain et pour simplifier le schéma électronique, une stratégie de commande en tout ou rien est utilisée. Ce mode de fonctionnement suppose que la modulation d'entrefer provoquée par les tensions appliquées soit
10 faible. Cette propriété est obtenue grâce au fort amortissement provoqué par le film de gaz séparant les miroirs 1, 2 qui filtre naturellement les composantes de haute fréquence des tensions appliquées comme des accélérations. Cela permet de réduire la bande passante du régulateur à quelques Hertz.
15

L'unité de commande 10 (associée à un oscillateur non représenté) est un circuit numérique qui séquence les opérations dans le temps et effectue l'ensemble des calculs.

20 Le fonctionnement est cadencé de manière périodique à une fréquence F_e dite fréquence temps réel selon le chronogramme de la figure 4.

Pour ce qui concerne l'actionnement, chaque commande T_{ci} est caractérisée par son rapport cyclique η_i au
25 temps de cycle T_e qui détermine son efficacité moyenne :

$$\eta_i = \frac{T_{ci}}{T_e}$$

La « fréquence » et le nombre de « périodes » (arbitrairement fixé à 2 sur le chronogramme) du signal d'excitation sont des variables d'ajustement permettant
30 l'optimisation du rapport signal/bruit.

En négligeant les limitations de bande passante de l'électronique, le produit des gains du filtre anti-repliement 23 et du convertisseur analogique/numérique 24 peut être assimilé à un gain noté a :

$$y = R \cdot \left[\sum_{i=1}^4 \frac{a}{C_b} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot s_i}{e_i} \cdot v_i + C_{ref} \cdot v_5 + Q_0 \right) \right] + y_0$$

où R (le signal de reset de l'amplificateur de charge 22) vaut 0 ou 1, Q_0 désignant la quantité de charge injectée par l'interrupteur des convertisseurs numérique/analogique 21 durant son ouverture, y_0 étant l'offset de l'ensemble amplificateur de charge 22 + filtre 23 + convertisseur analogique/numérique 24.

Pour ce qui concerne la détection, le système est cadencé par une horloge haute dite de sur-échantillonnage caractérisée par sa période T_s . Pour simplifier le chronogramme de la figure 5, la quantification temporelle liée à T_s n'est pas représentée : ainsi le chronogramme de la figure 5 ne montre que l'enveloppe des signaux numériques associés aux signaux analogiques du chronogramme de la figure 4 (période T_d).

Les durées réduites caractérisant le timing sont notées :

Notation	Rôle	Remarque
N_e	Temps réel	$N_e \gg 1$
N_c	Commande	$N_c > 0,5N_e$ (dynamique de commande)
N_d	Détection	$N_d = N_e - N_c$
N_r	Relaxation	réinitialisation
N_h	État haut	= état bas
N_p	Nombre de « périodes d'excitation »	Deux périodes sur le chronogramme
N_a	Ajustement	

Pour gérer supplément les timings, il est préférable de choisir une fréquence de sur-échantillonnage suffisamment grande devant la fréquence temps réel (typiquement $T_s = 10\mu s$ et $T_e = 10ms$).

La sortie y du convertisseur analogique/numérique 24 est démultiplexée, démodulée et cumulée dans la même opération par l'unité de commande 10 pour obtenir le signal ydm_i :

$$ydm_i = \sum_1^{N_d} y \cdot d_i$$

$$d_i = -1, 0 \text{ ou } +1$$

Le cumul est remis à zéro à chaque période de temps réel par le signal R de reset de l'amplificateur de charge 22.

Les durées hautes et basses de l'excitation étant choisies égales de sorte à rejeter les biais Q_0 et y_0 lors de la démodulation, on obtient (avec i variant de 1 à 4 pour les transducteurs) :

$$ydm_i = m \cdot \frac{a}{C_b} \cdot \frac{\varepsilon \cdot S_i}{e_i} \cdot V_{ref}$$

$$ydm_5 = m \cdot \frac{a}{C_b} \cdot C_{ref} \cdot V_{ref}$$

Pour s'affranchir des incertitudes liées à a , C_b et V_{ref} , il suffit de calculer le ratio :

$$x_i = \frac{ydm_5}{ydm_i} = \frac{C_{ref}}{\varepsilon \cdot S_i} \cdot e_i \rightarrow e_i = \frac{\varepsilon \cdot S_i}{C_{ref}} \cdot x_i$$

L'estimée de l'entrefer ne dépend ainsi que :

- de la permittivité diélectrique ε du gaz séparant les miroirs,
- des surfaces S_i des miroirs,
- de la capacité de référence C_{ref} .

Par ailleurs, les erreurs différentielles sont affectées uniquement par les anisotropies de surface des électrodes.

Les quatre transducteurs observés perpendiculairement au miroir sont numérotés de 1 à 4 dans le sens horaire. On forme alors les vecteurs d'observation et de commande de la manière suivante, e_i (avec i variant de 1

à 4) désignant les entrefers estimés pour chacun des quatre transducteurs :

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad \eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \end{bmatrix}$$

5 Afin de mieux maîtriser les anisotropies de gain entre les différents transducteurs d'un même miroir, la solution retenue utilise quatre détecteurs/actionneurs symétriques.

Cette solution hyperstatique peut conduire à exercer des contraintes insupportables sur le miroir.

10 Ce problème est résolu simplement en ramenant le système physique à quatre entrées et quatre sorties à un système virtuel à trois entrées et trois sorties mieux adapté au besoin.

15 Pour cela, l'asservissement est réalisé selon le synoptique de la figure 6.

Il revient alors aux matrices A et B de réduire la dimension apparente du système.

La matrice A est choisie de sorte que le vecteur de sortie soit constitué :

- 20
- de l'entrefer moyen (indice m).
 - du roulis (indice r).
 - du tangage (indice t).

La matrice A a alors la forme suivante :

$$A = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

25 Ce qui permet de passer des entrefers physiques e estimés aux entrefers virtuels e_v :

$$e_v = \begin{bmatrix} e_m \\ e_r \\ e_t \end{bmatrix} = A \cdot e$$

Une estimée d'une déformée ou courbure du miroir peut être obtenue en ajoutant à A une quatrième ligne de la forme [1 1 -1 -1]. Théoriquement, la quatrième compo-
sante de l'entrefer virtuel e_v , notée e_c , doit être natu-
rellement voisine de zéro, car cela correspond à une con-
figuration d'énergie de déformation minimale.

Le système réel à quatre entrées et quatre sor-
ties est dans une large mesure assimilable à quatre sous-
systèmes indépendants mais identiques entre eux, la ma-
trice de transfert $H(p)$ se réduit alors à un scalaire :

$$e = H(p) \cdot \eta$$

On impose alors au système virtuel un comporte-
ment identique à celui du système réel :

$$e_v = H(p) \cdot \eta_v \rightarrow A \cdot e = H(p) \cdot \eta_v \rightarrow B \cdot A \cdot e = H(p) \cdot B \cdot \eta_v = H(p) \cdot \eta$$

Ceci impose :

$$B \cdot A = I \rightarrow B = A^T \cdot (A \cdot A^T)^{-1} = B = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Les correcteurs numériques $C_m(z)$, $C_r(z)$ et $C_t(z)$ sont cadencés à T_e , ils sont synthétisés en fonction des caractéristiques électromécaniques du système physique et de la dynamique souhaitée en boucle fermée.

Les tensions de contrôle sont déterminées par l'unité de commande à partir de consignes d'entrefer moyen, de roulis et de tangage.

Les tensions de commande des transducteurs sont de préférence égales à une même tension de référence. L'excitation des capacités par la même tension de référence contribue à la maîtrise de l'anisotropie de gain en détection.

La structure de l'interféromètre n'a pas été détaillée hormis les parties de celle-ci en lien avec l'invention. Pour améliorer la précision de

l'interféromètre, cette structure est conçue de façon connue en elle-même pour compenser au moins en partie les perturbations induites par :

5 - la thermique qui met en jeu des constantes de temps longues, elle intervient dans le dimensionnement quasi-statique.

 - les vibrations mécaniques qui déterminent le besoin en termes de bande passante.

10 - les perturbations électromagnétiques (la partie des perturbations électromagnétiques contre laquelle l'unité de commande 10 est impuissante sera prise en compte lors de la conception de l'interféromètre en prévoyant par exemple un blindage, des liaisons courtes...).

15 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.

20 En particulier, les moyens de réglage peuvent comprendre trois, quatre transducteurs ou plus. Les actionneurs et les détecteurs peuvent être des transducteurs distincts.

 Les transducteurs peuvent être montés directement sur les miroirs ou sur des parties solidaires de ceux-ci.

25 Les transducteurs peuvent être commandés en tout ou rien ou en modulation continue.

REVENDICATIONS

1. Interféromètre comportant un support (1) sur lequel sont monté un miroir fixe et un miroir mobile
5 s'étendant parallèlement l'un à l'autre, et des moyens d'asservissement d'un écartement des miroirs l'un par rapport à l'autre, caractérisé en ce que le miroir mobile est relié au support par des moyens de suspension élastique et en ce que les moyens d'asservissement de
10 l'écartement des miroirs comportent au moins trois paires d'électrodes en regard qui sont reliées à une unité de commande agencée pour alimenter les électrodes de manière qu'elles forment des actionneurs et des détecteurs électrostatiques pour maintenir en position le miroir mobile
15 en mettant sous contrainte les moyens de suspensions.

2. Interféromètre selon la revendication 1, dans lequel trois paires d'électrodes forment les actionneurs et trois paires d'électrodes forment les détecteurs.

3. Interféromètre selon la revendication 1, dans
20 lequel l'unité de commande est agencée pour piloter les trois paires d'électrodes de telle manière que chacune d'elles forment alternativement un des actionneurs et un des détecteurs.

4. Interféromètre selon la revendication 1, dans
25 lequel les paires d'électrodes sont au nombre de quatre et sont symétriquement disposées par rapport aux miroirs.

5. Interféromètre selon la revendication 1, dans lequel l'une des électrodes de chaque paire d'électrodes est reliée à un convertisseur numérique/analogique et
30 l'autre des électrodes chaque paire d'électrodes est reliée à une entrée d'un amplificateur de charge qui est commun à toutes les paires d'électrodes et qui est bouclé par un condensateur, l'amplificateur de charge ayant une sortie reliée via un filtre anti-repliement à un conver-
35 tisseur analogique/numérique.

6. Interféromètre selon la revendication 5, dans lequel un condensateur de référence a une première électrode reliée à un convertisseur numérique/analogique et une deuxième électrode reliée à l'entrée de l'amplificateur de charge.

7. Interféromètre selon la revendication 1, dans lequel les électrodes sont formées chacune d'une couche métallique déposée directement sur le miroir.

8. Procédé de commande de transducteurs électrostatiques d'ajustement de la position d'un miroir mobile par rapport à un miroir fixe d'un interféromètre optique, le miroir mobile étant relié par des moyens de suspension élastique à un support dont est solidaire le miroir fixe, le procédé comprenant les étapes de :

- déterminer un entrefer de chaque transducteur par une mesure capacitive,
- estimer un écartement des miroirs en calculant une moyenne des entrefers déterminés,
- déterminer et appliquer une tension de commande pour chaque transducteur pour engendrer une force électrostatique mettant sous contrainte les moyens de suspensions de manière à modifier l'écartement estimé en maintenant les miroirs parallèles l'un à l'autre.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les tensions de commande sont appliquées en tout ou rien.

10. Procédé selon la revendication 8, dans lequel les transducteurs sont au nombre de quatre correspondant à un système réel hyperstatique à quatre entrées et quatre sorties, et un asservissement des transducteurs est effectué en ramenant le système réel à un système virtuel à trois entrées et trois sorties.

11. Procédé selon la revendication 8, comprenant l'étape d'estimer une déformée du miroir mobile à partir des entrefers déterminés.

12. Procédé selon la revendication 8, dans lequel

les tensions de commande des transducteurs sont égales à une même tension de référence.

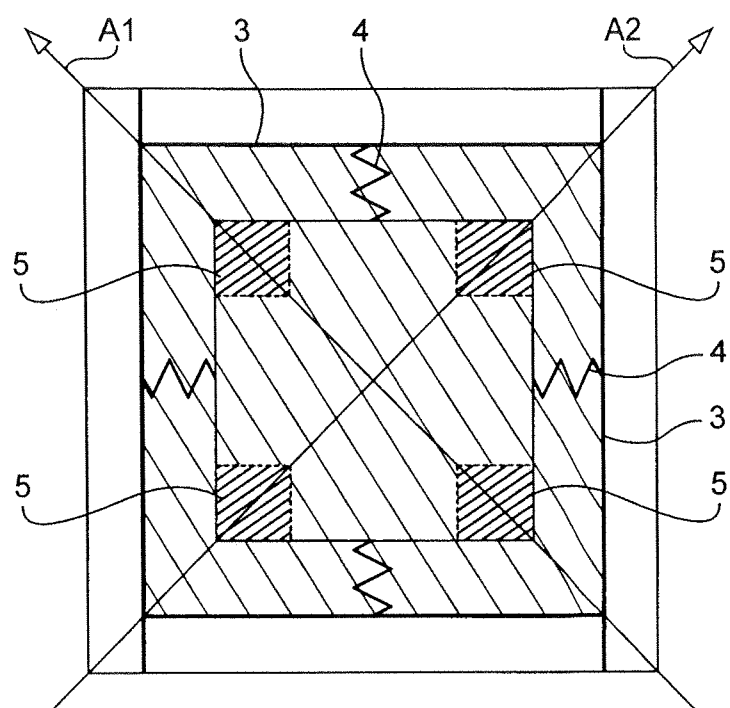


Fig. 1

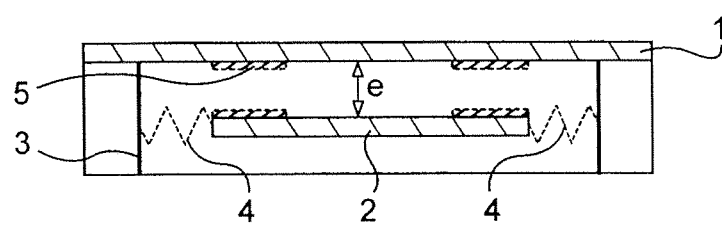


Fig. 2

2/3

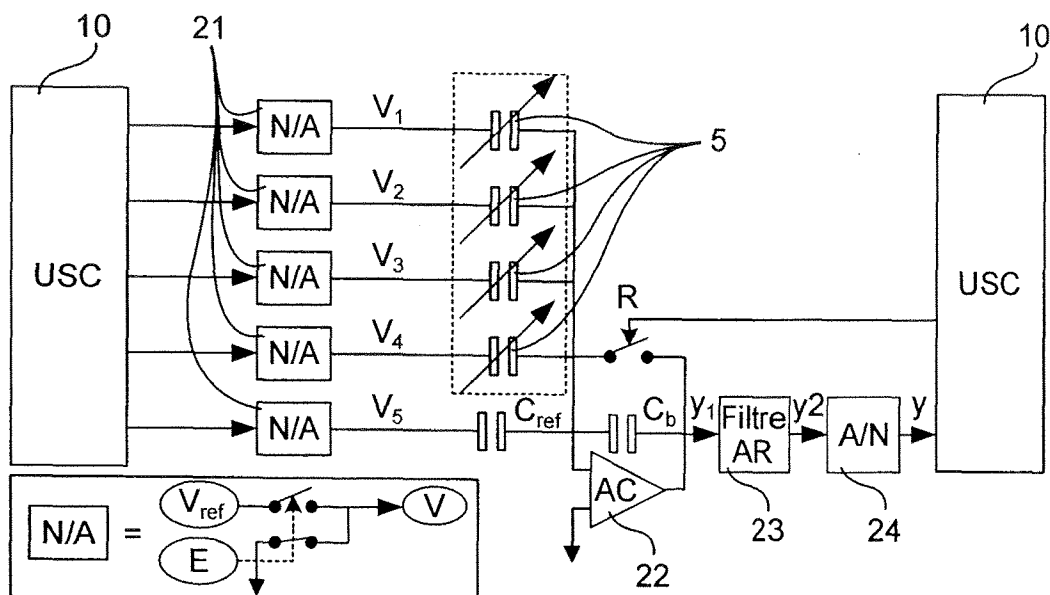


Fig. 3

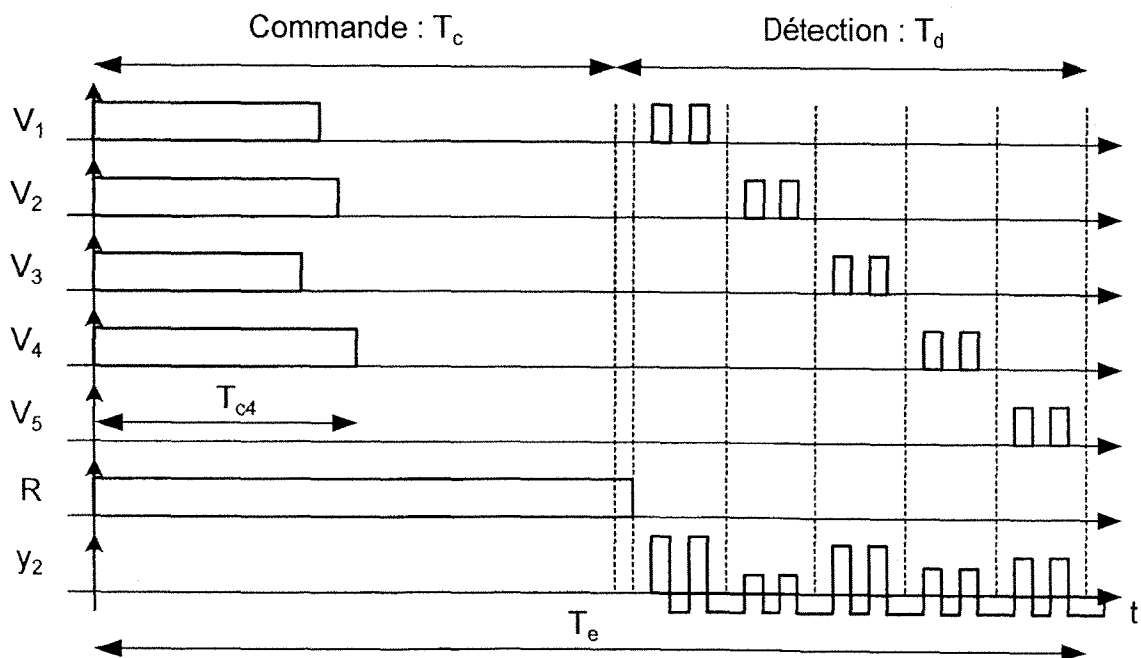


Fig. 4

3/3

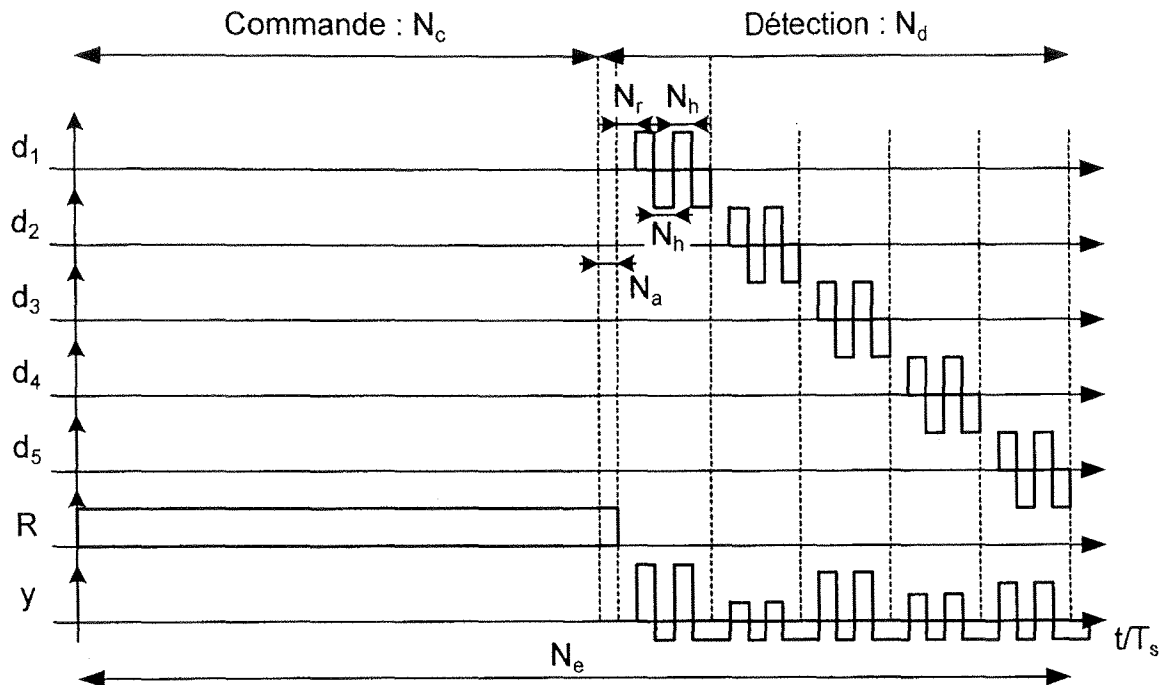


Fig. 5

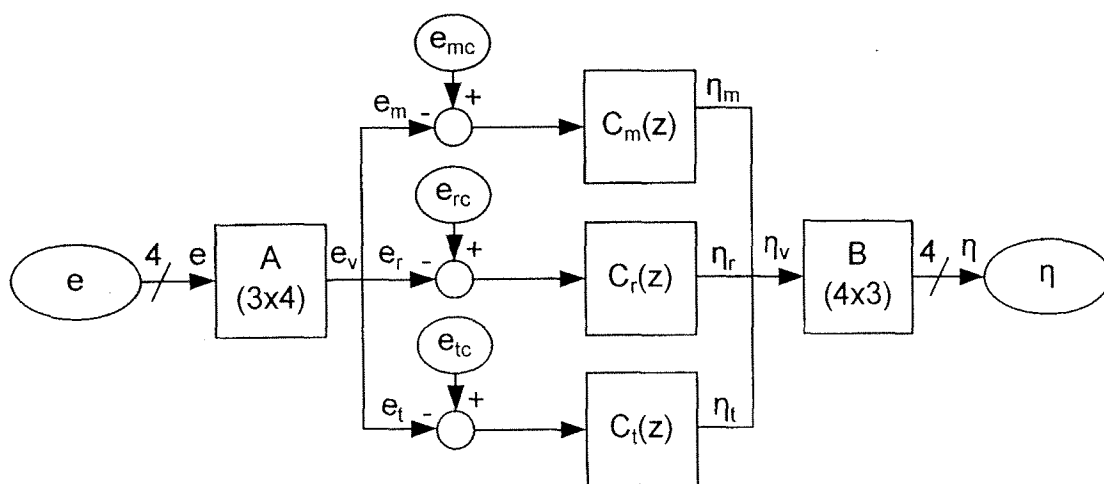


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/071570

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G02B5/28 G02B26/00 G01J3/26
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)
G02B G01J

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 02/086582 A1 (SOLUS MICRO TECHNOLOGIES INC [US]; LITTLE MICHAEL J [US]; POLLOCK RON) 31 October 2002 (2002-10-31) page 5, line 1 - page 11, line 12 figures 2A,2B,3A,3B,4A,4B -----	1-12
A	DE 10 2010 031206 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 12 January 2012 (2012-01-12) paragraphs [0001], [0033] - [0035], [0037], [0051], [0063]; figures 3,4 -----	1-12



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

4 December 2014

Date of mailing of the international search report

08/01/2015

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

Fazio, Valentina

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2014/071570

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 02086582 A1	31-10-2002	US 2002196817 A1	26-12-2002
		US 2003011866 A1	16-01-2003
		WO 02086582 A1	31-10-2002
		WO 02086587 A1	31-10-2002

DE 102010031206 A1	12-01-2012	DE 102010031206 A1	12-01-2012
		EP 2591322 A1	15-05-2013
		WO 2012004379 A1	12-01-2012

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2014/071570

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G02B5/28 G02B26/00 G01J3/26 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) G02B G01J		
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		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 02/086582 A1 (SOLUS MICRO TECHNOLOGIES INC [US]; LITTLE MICHAEL J [US]; POLLOCK RON) 31 octobre 2002 (2002-10-31) page 5, ligne 1 - page 11, ligne 12 figures 2A,2B,3A,3B,4A,4B -----	1-12
A	DE 10 2010 031206 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 12 janvier 2012 (2012-01-12) alinéas [0001], [0033] - [0035], [0037], [0051], [0063]; figures 3,4 -----	1-12
☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 4 décembre 2014	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 08/01/2015	
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 Fazio, Valentina	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2014/071570

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 02086582 A1	31-10-2002	US 2002196817 A1	26-12-2002
		US 2003011866 A1	16-01-2003
		WO 02086582 A1	31-10-2002
		WO 02086587 A1	31-10-2002

DE 102010031206 A1	12-01-2012	DE 102010031206 A1	12-01-2012
		EP 2591322 A1	15-05-2013
		WO 2012004379 A1	12-01-2012
