

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 31.01.19.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 07.08.20 Bulletin 20/32.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : Centre National de la Recherche Scientifique Etablissement public — FR, OBSERVATOIRE DE LA COTE D'AZUR Etablissement public — FR, Université de Nice Sophia Antipolis Etablissement public — FR et Université Grenoble Alpes Etablissement public — FR.

72 Inventeur(s) : HENAULT François et SPANG Alain.

73 Titulaire(s) : Centre National de la Recherche Scientifique Etablissement public, OBSERVATOIRE DE LA COTE D'AZUR Etablissement public, Université de Nice Sophia Antipolis Etablissement public, Université Grenoble Alpes Etablissement public.

74 Mandataire(s) : MARKS & CLERK France.

54 Système de contrôle de surfaces d'onde optique par filtre à gradient de densité.

57 Le domaine technique de l'invention est celui des systèmes de contrôle d'une surface d'onde optique issue d'un dispositif optique (1), ledit dispositif optique comportant une pupille de sortie (3), ledit système de contrôle comportant une tête de mesure optique (10) et un calculateur (20) de traitements des images issues de ladite tête de mesure optique.

La tête de mesure optique comporte :

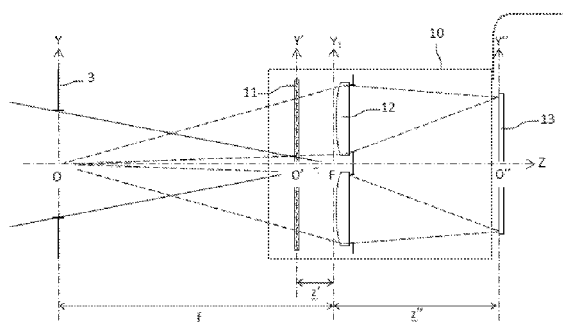
un filtre (11) à gradient de densité, la densité variant de façon périodique dans les deux directions de l'espace,

une trame matricielle comportant au moins quatre lentilles identiques, de forme carrée, de même focale et disposées symétriquement,

une matrice (13) de photodétecteurs, chacune des quatre lentilles formant de la pupille une image dans le plan de cette matrice.

Le calculateur de traitement des images comporte des moyens de calcul permettant de calculer les dérivées partielles et de la surface d'onde  $\Delta(x, y)$  dans le plan de la pupille de sortie.

Figure pour l'abrégé : Fig. 2



## Description

### **Titre de l'invention : Système de contrôle de surfaces d'onde optique par filtre à gradient de densité**

[0001] Le domaine technique de l'invention est celui de la mesure et du contrôle de surfaces d'onde optiques. Un grand nombre de domaines techniques nécessite le contrôle de surfaces d'onde. On citera plus particulièrement, mais de manière non exhaustive, le contrôle de la qualité de surfaces optiques ou de systèmes optiques, le contrôle d'optiques adaptatives utilisées dans des domaines allant de l'astronomie à l'ophtalmologie.

[0002] Le contrôle de la qualité des surfaces optiques est un domaine extrêmement vaste qui inclut la métrologie de composants optiques individuels, l'alignement de systèmes optiques complexes, ou l'évaluation de la qualité de faisceaux laser. Il couvre les domaines spectraux visible, infrarouge ou ultraviolet. Les appareils de mesure utilisés actuellement sont des interféromètres qui réclament le développement de systèmes imposants, ou de senseurs de front d'onde plus compacts mais de moindre précision et de résolution plus faible. On trouvera dans l'ouvrage de D. Malacara intitulé « Optical Shop Testing » Third Edition, Willey 2007 des informations complémentaires sur ce point.

[0003] Les grands télescopes utilisés pour l'astronomie comportent des systèmes d'optique adaptative qui nécessitent des senseurs de front d'onde. Ces systèmes ne sont pas nécessairement bien adaptés à l'observation d'objets étendus tels que des galaxies ou des amas globulaires. Par ailleurs, ces systèmes peuvent comporter des étoiles artificielles obtenues à partir de faisceaux laser. Dans ce cas, les systèmes d'optiques adaptatives sont nécessairement complexes dans la mesure où ils comportent autant de senseurs de front d'onde que d'étoiles artificielles. On trouvera d'autres informations sur ce sujet, dans les publications suivantes :

- J.W. Hardy, J.E. Lefebvre, C.L. Kolioupoulos intitulée « Real-time atmospheric compensation » J. Opt. Soc. Am. Vol. 67, p. 360-369 (1977)

- R. V. Shack, B.C. Platt intitulée « Production and use of a lenticular Hartmann screen » J. Opt. Soc. Am. Vol. 61, p. 656 (1971)

- J. Primot, N. Guérineau intitulée « Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard », parue dans Applied Optics vol. 39, P. 5715-5720 (2000).

[0004] En ophtalmologie, on utilise également des systèmes d'optique adaptative basés sur l'utilisation de sources laser ponctuelles qui peuvent poser d'autres problèmes d'utilisation. On trouvera dans la publication de J. Lang, B. Grimm, S. Goelz, J. F.

Bille, intitulée « Objective measurement of wave aberrations of the humane eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor, parue dans J. Opt. Soc. Am. A, vol. 11, p. 1949-2685 (1994) d'autres informations sur ce sujet.

- [0005] Le système de contrôle des surfaces d'onde optique selon l'invention ne présente pas les inconvénients précédents. Il comporte une tête optique qui ne comporte que des éléments optiques simples à réaliser et un traitement d'images. Plus précisément, l'invention a pour objet un système de contrôle d'une surface d'onde optique issue d'un dispositif optique, ledit dispositif optique comportant une pupille de sortie, ledit système de contrôle comportant une tête de mesure optique et un calculateur de traitements des images issues de ladite tête de mesure optique, caractérisé en ce que
- la tête de mesure optique comporte :
  - un filtre à gradient de densité, dans un plan référencé  $(x', y')$  perpendiculaire à l'axe optique de la tête de mesure optique, la transmission  $T(x', y')$  dudit filtre étant régie par l'équation :

[0006] [Math.1]

$$T(x', y') = \frac{1 + \sin(2\sqrt{2}\pi(x' - y')/p_x) \sin(2\sqrt{2}\pi(x' + y')/p_y)}{2}$$

$p_x$  et  $p_y$  représentant les périodes des deux fonctions sinusoïdales dépendant respectivement de  $(x' - y')$  et de  $(x' + y')$

- une trame matricielle de lentilles identiques, de forme carrée, de même focale, ladite trame matricielle comportant au moins quatre lentilles, chaque centre d'une des quatre lentilles étant disposé sur un axe passant par le centre de la pupille de sortie et un point  $O'M'(i, j)$  du filtre à gradient de densité tel que, dans le plan référencé  $(x', y')$ ,

[0007] [Math.2]

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} i(m + 0.25)p_x/\sqrt{2} \\ j(n + 0.25)p_y/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

- $i$  et  $j$  pouvant prendre les valeurs -1 et +1,  $m$  et  $n$  étant des entiers positifs.
- une matrice de photodétecteurs, chacune des quatre lentilles formant de la pupille une image dans le plan de cette matrice, ces images étant référencés  $I'_k(x, y)$ ,  $k$  variant de 1 à 4 ;
  - le calculateur de traitement des images comporte des moyens de calcul permettant de calculer les dérivées partielles  $\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y)$  et  $\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y)$  de la surface d'onde  $\Delta(x, y)$  dans le plan de la pupille de sortie, ces dérivées partielles étant égales à

[0008] [Math.3]

$$\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y) = Ax + B \sin^{-1} \left( \frac{I_4''(x, y) - I_3''(x, y) + I_2''(x, y) - I_1''(x, y)}{C} \right)$$

[0009] [Math.4]

$$\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y) = Ay + B \sin^{-1} \left( \frac{I_4''(x, y) + I_3''(x, y) - I_2''(x, y) - I_1''(x, y)}{C} \right)$$

A, B et C étant des constantes dépendant des paramètres géométriques de la tête de mesure optique.

[0010] Avantagement, lorsque le dispositif optique est un objectif, son plan de focalisation est situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles.

[0011] Avantagement, lorsque le dispositif optique est un afocal, la tête de mesure optique comporte une optique additionnelle disposée dans la pupille de sortie, de façon que le plan de focalisation de ladite optique additionnelle est situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles.

[0012] Avantagement, la trame matricielle comporte au moins un second quadruplet de lentilles.

[0013] Avantagement, les deux périodes  $p_x$  et  $p_y$  sont égales.

[0014] L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

[0015] [fig.1]

représente une vue générale du système de contrôle selon l'invention ;

[0016] [fig.2]

représente la tête de mesure optique du système de contrôle selon l'invention ;

[0017] [fig.3]

représente les maxima et les minima du filtre à gradient de densité selon l'invention ;

[0018] [fig.4]

représente les courbes de niveaux de la partie centrale du filtre selon l'invention ;

[0019] [fig.5]

représente une première répartition des lentilles de la trame matricielle selon l'invention ;

[0020] [fig.6]

représente une seconde répartition des lentilles de la trame matricielle selon l'invention ;

[0021] [fig.7]

représente une troisième répartition des lentilles de la trame matricielle selon l'invention ;

[0022] [fig.8]

représente une quatrième répartition des lentilles de la trame matricielle selon l'invention.

[0023] Le synoptique général du système de contrôle des surfaces d'onde optique selon l'invention est représenté sur la figure 1. Il comporte essentiellement une tête optique 10 et un calculateur de traitement d'images 20. La tête optique comporte une matrice de photodétecteurs 13. Celle-ci est reliée à un premier dispositif de visualisation 21 qui affiche les images issues de la matrice de photodétecteurs. De la même façon, le calculateur de traitement d'images comporte un second dispositif de visualisation 22 permettant d'afficher, entre autres, les images traitées et les informations nécessaires au traitement.

[0024] Ce système est destiné à contrôler un dispositif optique 1. Celui-ci forme d'un objet lumineux 2 ou d'une source lumineuse une image lumineuse. Lorsque le dispositif optique est un objectif, cette image est réelle. Lorsque le dispositif est un système afocal, l'image est à l'infini. Comme on le verra dans la suite de la description, le système de contrôle selon l'invention est apte à contrôler ces deux types de dispositifs optiques. Dans le cas de la figure 1, le dispositif optique est un objectif.

[0025] Le dispositif optique 1 comporte une pupille 3. L'objet du système de contrôle est de mesurer la surface d'onde de l'image lumineuse donnée par le dispositif optique au niveau de cette pupille. La pupille est généralement de forme circulaire. Elle peut comprendre une obturation centrale et son support éventuel.

[0026] La tête optique selon l'invention est représentée en figure 2. Elle comprend essentiellement un filtre 11 à gradient de densité, une trame matricielle de lentilles 12 et la matrice 13 de photodétecteurs comme précédemment indiquée.

[0027] Afin de déterminer les positions respectives de ces différents éléments, on a adopté les conventions suivantes.

[0028] On note OXYZ le repère attaché à la pupille du dispositif optique. Le point O correspond au centre de la pupille et OZ est l'axe optique du dispositif optique. L'axe X est perpendiculaire au plan de la figure 2. Les points P de la pupille situés dans le plan OXY sont désignés par leurs coordonnées cartésiennes (x, y). Dans ce repère, la surface d'onde à mesurer est notée  $\Delta(x, y)$ .

[0029] On note f la distance qui sépare le plan de la pupille du plan de focalisation du dispositif optique et F le point d'intersection de ce plan de focalisation avec l'axe optique.

[0030] On note O'X'Y'Z le repère attaché au plan du filtre à gradient de densité. L'axe X' est perpendiculaire au plan de la figure 2. Le point O' est situé sur l'axe optique à une

distance  $z'$  égale à  $FO'$  du plan de focalisation. Les points M du filtre situés dans le plan  $O'X'Y'$  sont désignés par leurs coordonnées cartésiennes  $(x', y')$ .

[0031] On note  $FX_1Y_1Z$  le repère attaché au plan de focalisation du dispositif optique. L'axe  $X_1$  est perpendiculaire au plan de la figure 2. Les points I situés dans le plan  $FX_1Y_1$  sont désignés par leurs coordonnées cartésiennes  $(x_1, y_1)$ . La trame matricielle de lentilles se trouve dans ce plan.

[0032] On note enfin  $O''X''Y''Z$  le repère attaché à la matrice de photodétecteurs. L'axe  $X''$  est perpendiculaire au plan de la figure 2. Les images de la pupille formées par les lentilles de la trame matricielle sont situées dans le plan  $O''X''Y''$ . Le point  $O''$  est situé sur l'axe optique à une distance  $z''$  du plan  $FX_1Y_1$ . Les points P'' situés dans ce plan  $O''X''Y''$  sont désignés par leurs coordonnées cartésiennes  $(x'', y'')$ .

[0033] Le filtre à gradient de densité est situé dans le plan  $O'X'Y'$ . Sa transmission  $T(x', y')$  est égale au produit de deux fonctions sinusoïdales tournées de 45 degrés autour de l'axe optique. Plus précisément, la transmission du filtre est égale à :

[Math.5]

$$T(x', y') = \frac{1 + \sin(2\sqrt{2}\pi(x' - y')/p_x) \sin(2\sqrt{2}\pi(x' + y')/p_y)}{2}$$

[0034]  $p_x$  et  $p_y$  représentent les périodes spatiales des deux fonctions sinusoïdales. Ces périodes peuvent être différentes. Dans la suite de la description, on considère que ces périodes sont identiques et égales à  $p$ .

[0035] Les minima de la fonction  $T(x', y')$  sont égaux à 0 et les maxima sont égaux à 1. La figure 3 représente la répartition de ces minima et de ces maxima dans le plan  $O'X'Y'$  du filtre à gradient de densité dans le cas de périodes identiques sur les deux axes. Sur cette figure 3, les maxima sont représentés par des cercles blancs et les minima par des cercles noirs.

[0036] La figure 4 représente les courbes de transmission de même valeur dans le plan  $O'X'Y'$  limité sur les deux axes aux valeurs comprises entre  $-p/4\sqrt{2}$  et  $+p/4\sqrt{2}$ . Les traits les plus épais correspondent aux valeurs de transmission les plus faibles.

[0037] Le filtre peut également comprendre un masque opaque comportant des ouvertures circulaires. L'emplacement de chaque ouverture correspond à celui d'une lentille de la trame matricielle et son diamètre est adapté aux dimensions de cette lentille. Plus généralement, la forme du masque correspond à celle de la pupille de la lentille.

[0038] Ce filtre peut être fabriqué au moyen de diverses technologies qui sont, notamment, la lithographie optique ou électronique, la nano-impression, l'enregistrement de plaques holographiques ou encore par des modulateurs à cristaux liquides.

[0039] La trame matricielle de mini-lentilles 12 est située dans le plan  $FX_1Y_1$ . Toutes les

lentilles qui la composent sont identiques et de section carrée. Les dimensions des lentilles sont comprises entre quelques millimètres et quelques centimètres. Les tolérances sur la conception et la fabrication de ces lentilles doivent être telles qu'elles ne perturbent pas la surface d'onde à analyser. Cela ne présente pas de difficultés particulières pour l'homme du métier, compte-tenu de la faible ouverture de ces lentilles.

[0040] La distance focale  $f_L$  des mini-lentilles est ajustée de façon que chacune d'entre elles forme une image de la pupille dans le plan  $O''X''Y''$  de la matrice de photodétecteurs.

[0041] Cette trame comporte  $4k$  lentilles,  $k$  étant un entier supérieur ou égal à 1. La trame peut donc comporter quatre lentilles, huit lentilles, douze lentilles et ainsi de suite. Les lentilles sont organisées par groupe de quatre disposées symétriquement autour de l'axe optique. Chaque centre d'une des quatre lentilles du groupe est disposée sur un axe passant par le centre  $O$  de la pupille de sortie et un point  $O'M'(i, j)$  du filtre à gradient de densité tel que, dans le plan référencé  $(x', y')$ ,

[0042] [Math.6]

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} i(m + 0.25)p_x/\sqrt{2} \\ j(n + 0.25)p_y/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$i$  et  $j$  pouvant prendre les valeurs  $-1$  et  $+1$ ,  $m$  et  $n$  étant des entiers positifs.

[0043] Les coordonnées des quatre centres  $I_{ij}$  des lentilles de chaque groupe dans le plan  $FX_1Y_1$  sont déduites de la relation :

[0044] [Math.7]

$$OI_{i,j} = \frac{f}{f+z'} OM'_{i,j}$$

[0045] Les figures 5, 6, 7 et 8 illustrent quatre exemples de répartitions possibles des dites lentilles 12. Elles sont représentées dans le plan  $FX_1Y_1$ . Sur ces figures, la période  $p$  est la même sur les deux axes. Ces figures comportent également le filtre à gradient de densité.

[0046] Sur la figure 5, la trame comporte un seul groupe de quatre lentilles. Dans cet exemple, les entiers  $m$  et  $n$  sont nuls et on a :

[0047] [Math.8]

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} 0.25i p/\sqrt{2} \\ 0.25j p/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

[0048] Cette configuration est la plus simple à réaliser dans la mesure où elle comprend un minimum de lentilles et que, de plus, elles sont collées les unes aux autres.

[0049] Sur la figure 6, la trame comporte également un seul groupe de quatre lentilles. Dans cet exemple,  $m$  et  $n$  sont égaux à 1 et on a :

[0050] [Math.9]

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} 1.25ip/\sqrt{2} \\ 1.25jp/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

[0051] Sur la figure 7, la trame comporte les deux groupes de quatre lentilles des figures 5 et 6.

[0052] Sur la figure 8, la trame comporte deux groupes de quatre lentilles. Les centres des premier et second groupes vérifient :

[0053] [Math.10]

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} 0.25ip/\sqrt{2} \\ 1.25jp/\sqrt{2} \end{bmatrix} \text{ et } O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} 1.25ip/\sqrt{2} \\ 0.25jp/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

[0054] La matrice de photodétecteurs est disposée dans le plan O''X''Y'' dans lequel se trouve les images de la pupille formées par les lentilles de la trame matricielle. La sensibilité de la matrice de photodétecteurs est adaptée à la bande spectrale de l'objet lumineux ou de la source lumineuse à contrôler. Cette matrice comporte un nombre de détecteurs adaptée à la résolution spatiale recherchée. A titre d'exemple, une matrice de 2048x2048 pixels est suffisante pour atteindre une résolution spatiale maximale de 1000x1000 sur la surface d'onde.

[0055] Dans ce qui précède, le dispositif optique est un objectif, son plan de focalisation est situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles. Lorsque le dispositif optique est un afocal, la tête de mesure optique comporte une optique additionnelle disposée dans la pupille de sortie, de façon que le plan de focalisation de ladite optique additionnelle soit situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles.

[0056] Il est également possible, quel que soit le type de dispositif optique à mesurer, d'ajouter une optique à focale variable permettant d'optimiser le contrôle en zoomant, par exemple, sur une zone particulière de la pupille.

[0057] Le calculateur de traitement d'images réalise les fonctions suivantes. Sa première fonction consiste à mémoriser les images brutes reçues par la matrice de photodétecteurs. Sa seconde fonction consiste à calibrer ces images brutes de façon à corriger les erreurs d'uniformité des pixels de la matrice de photodétecteurs. Cette calibration est obtenue à partir d'images connues enregistrées lors d'une phase de calibration préalable.

[0058] L'image ainsi calibrée est séparée en autant d'images secondaires qu'il y a de lentilles dans la trame matricielle. Chaque image secondaire est l'image de la pupille du dispositif optique donnée par une lentille particulière. Ces images secondaires sont recentrées dans le plan de la pupille. Chacune des images a une répartition d'intensité



notée  $I_k^*(x, y)$ ,  $k$  étant l'indice de l'image secondaire.

[0059] Les expressions analytiques des répartitions d'intensité des images sont obtenues à partir d'une analyse en diffraction de Fresnel. On trouvera des informations sur cette méthode dans la publication de F. Hénault, « Fresnel diffraction analysis of Ronchi and reverse Hartmann tests », submitted to J. Opt. Soc. Am. A.

[0060] A titre d'exemple, pour une configuration à quatre lentilles telle que représentée sur la figure 5, ces répartitions sont les suivantes :

[0061] [Math.11]

$$I_1^*(x, y) = \frac{5}{16} - \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) - \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) \\ - \frac{\cos 2\gamma}{8} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_x + 4\gamma) \\ - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_y + 4\gamma)$$

[0062] [Math.12]

$$I_2^*(x, y) = \frac{5}{16} + \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) - \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) \\ + \frac{\cos 2\gamma}{8} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_x + 4\gamma) \\ - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_y + 4\gamma)$$

[0063] [Math.13]

$$I_3^*(x, y) = \frac{5}{16} - \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) + \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) \\ + \frac{\cos 2\gamma}{8} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_x + 4\gamma) \\ - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_y + 4\gamma)$$

[0064] [Math.14]

$$I_4^*(x, y) = \frac{5}{16} + \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) + \frac{\cos \gamma}{4} \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) \\ - \frac{\cos 2\gamma}{8} \sin(\sqrt{2} \varphi'_x) \sin(\sqrt{2} \varphi'_y) - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_x + 4\gamma) \\ - \frac{1}{32} \cos(\sqrt{2} \varphi'_y + 4\gamma)$$

[0065] On a, en utilisant les notations précédentes :

[0066] [Math.15]

$$\varphi'_x = \frac{2\pi(f+z')}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y) + \frac{2\pi z'}{fp} x, \quad \varphi'_y = \frac{2\pi(f+z')}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y) + \frac{2\pi z'}{fp} y \text{ et}$$

$$\gamma = 2\pi \lambda \frac{z'(f+z')}{fp^2}$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y) \text{ et}$$

$\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y)$  représentent les dérivées de la surface d'onde en chaque point P de la pupille.

[0067] A partir des images secondaires, il est alors possible de calculer ces deux dérivées de la surface d'onde. On obtient :

[0068] [Math.16]

$$\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y) = \frac{z'}{f(f+z')} x + \frac{p}{2\pi\sqrt{2}(f+z')} \sin^{-1} \left( \frac{I_4^*(x, y) - I_2^*(x, y) + I_2^*(x, y) - I_1^*(x, y)}{\cos \gamma} \right)$$

[0069] [Math.17]

$$\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y) = \frac{z'}{f(f+z')} y + \frac{p}{2\pi\sqrt{2}(f+z')} \sin^{-1} \left( \frac{I_4^*(x, y) + I_2^*(x, y) - I_2^*(x, y) - I_1^*(x, y)}{\cos \gamma} \right)$$

[0070] Enfin, il est possible de reconstruire la surface d'onde  $\Delta(x, y)$  à partir de ces deux dérivées partielles à partir de leur intégration. On trouvera des informations complémentaires sur ce point dans la publication de F. Roddier, C. Roddier, « Wavefront reconstruction using iterative Fourier transforms, » Applied Optics vol. 30, p 1325-1327 (1991).

[0071] L'optimisation de la période spatiale du filtre à gradient de densité doit satisfaire à deux contraintes antagonistes.

[0072] Les équations donnant les variations de phase  $\varphi'_x$  et  $\varphi'_y$  montrent que les grandeurs à mesurer  $\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y)$  et  $\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y)$  sont amplifiées par un facteur  $g$  que l'on appelle gain et qui vaut :  $g = \frac{2\pi(f+z')}{p}$ .

[0073] Le choix d'un gain élevé permet de maximiser les variations d'intensité dans les images acquises. Le respect de ce critère de sensibilité conduit à favoriser les courtes

périodes spatiales de façon à minimiser le paramètre  $p$ .

- [0074] Par ailleurs, l'utilisation d'un filtre construit à partir de fonctions périodiques entraîne un effet de répliques de l'image de la pupille du dispositif optique à mesurer. Cet effet a pour conséquence le décentrement relatif  $\rho$  des images secondaires. On démontre que ce paramètre vaut :

$$\rho = \frac{\lambda(f+z')}{Dp}, \text{ D étant le diamètre de la pupille.}$$

- [0075] Ce paramètre doit être aussi faible que possible, typiquement inférieur à 1%, ce qui conduit à favoriser les longues périodes spatiales.

- [0076] Il est possible d'établir un compromis entre ces deux tendances antagonistes au moyen d'un critère  $C$  des moindres carrés qui vaut :

- [0077] [Math.18]

$$C = \rho^2 + \frac{w^2}{g^2} = \frac{\lambda^2(f+z')^2}{D^2p^2} + \frac{w^2p^2}{4\pi^2(f+z')^2}$$

- [0078] Où  $w$  est un facteur d'échelle compris entre  $10^3$  et  $10^4$ . Le minimum du critère est atteint lorsque la période  $p_0$  vaut :

- [0079] [Math.19]

$$p_0 = (f+z') \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{wD}}$$

- [0080] Cette période  $p_0$  peut être affinée au moyen de simulations.

- [0081] A titre d'exemple, pour un télescope de 100 mètres de focale, de 10 mètre d'ouverture et utilisé dans le visible à une longueur d'onde centrée sur 0.5 micron, la tête optique étant disposée au foyer de ce télescope, la période spatiale du filtre est de 1 millimètre.

- [0082] La précision de mesure obtenue est de l'ordre du centième de longueur d'onde et le temps de mesure est inférieur à un centième de seconde. Ce temps est suffisamment court pour s'affranchir des perturbations générées par l'environnement telles que les micro-vibrations et les turbulences atmosphériques.

## Revendications

[Revendication 1]

Système de contrôle d'une surface d'onde optique issue d'un dispositif optique (1), ledit dispositif optique comportant une pupille de sortie (3), ledit système de contrôle comportant une tête de mesure optique (10) et un calculateur (20) de traitements des images issues de ladite tête de mesure optique, caractérisé en ce que

- la tête de mesure optique comporte :

- un filtre (11) à gradient de densité, dans un plan référencé ( $x'$ ,  $y'$ ) perpendiculaire à l'axe optique de la tête de mesure optique, la transmission  $T(x', y')$  dudit filtre étant régie par l'équation :

$$T(x', y') = \frac{1 + \sin(2\sqrt{2}\pi(x' - y')/p_x) \sin(2\sqrt{2}\pi(x' + y')/p_y)}{2}$$

$p_x$  et  $p_y$  représentant les périodes des deux fonctions sinusoidales dépendant respectivement de  $(x' - y')$  et de  $(x' + y')$

- une trame matricielle de lentilles (12) identiques, de forme carrée, de même focale, ladite trame matricielle comportant au moins quatre lentilles, chaque centre d'une des quatre lentilles étant disposé sur un axe passant par le centre de la pupille de sortie et un point  $O'M'(i, j)$  du filtre à gradient de densité tel que, dans le plan référencé ( $x'$ ,  $y'$ ),

$$O'M'_{i,j} = \begin{bmatrix} i(m + 0.25)p_x/\sqrt{2} \\ j(n + 0.25)p_y/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$i$  et  $j$  pouvant prendre les valeurs -1 et +1,  $m$  et  $n$  étant des entiers positifs.

- une matrice (13) de photodétecteurs, chacune des quatre lentilles formant de la pupille une image dans le plan de cette matrice, ces images étant référencées  $I'_k(x, y)$ ,  $k$  variant de 1 à 4 ;
- le calculateur (20) de traitement des images comporte des moyens de calcul permettant de calculer les dérivées partielles  $\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y)$  et  $\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y)$  de la surface d'onde  $\Delta(x, y)$  dans le plan

(x, y) de la pupille de sortie, ces dérivées partielles étant égales à

$$\frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y) = Ax + B \sin^{-1} \left( \frac{I_2^*(x, y) - I_2^*(x, y) + I_2^*(x, y) - I_1^*(x, y)}{C} \right)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial y}(x, y) = Ay + B \sin^{-1} \left( \frac{I_4^*(x, y) + I_2^*(x, y) - I_2^*(x, y) - I_1^*(x, y)}{C} \right)$$

A, B et C étant des constantes dépendant des paramètres géométriques de la tête de mesure optique.

- [Revendication 2] Système de contrôle selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif optique est un objectif, son plan de focalisation est situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles.
- [Revendication 3] Système de contrôle selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif optique est un afocal, la tête de mesure optique comporte une optique additionnelle disposée dans la pupille de sortie, de façon que le plan de focalisation de ladite optique additionnelle est situé dans le plan de la trame matricielle des lentilles.
- [Revendication 4] Système de contrôle selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la trame matricielle comporte au moins un second quadruplet de lentilles.
- [Revendication 5] Système de contrôle selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les deux périodes  $p_x$  et  $p_y$  sont égales.

[Fig. 1]

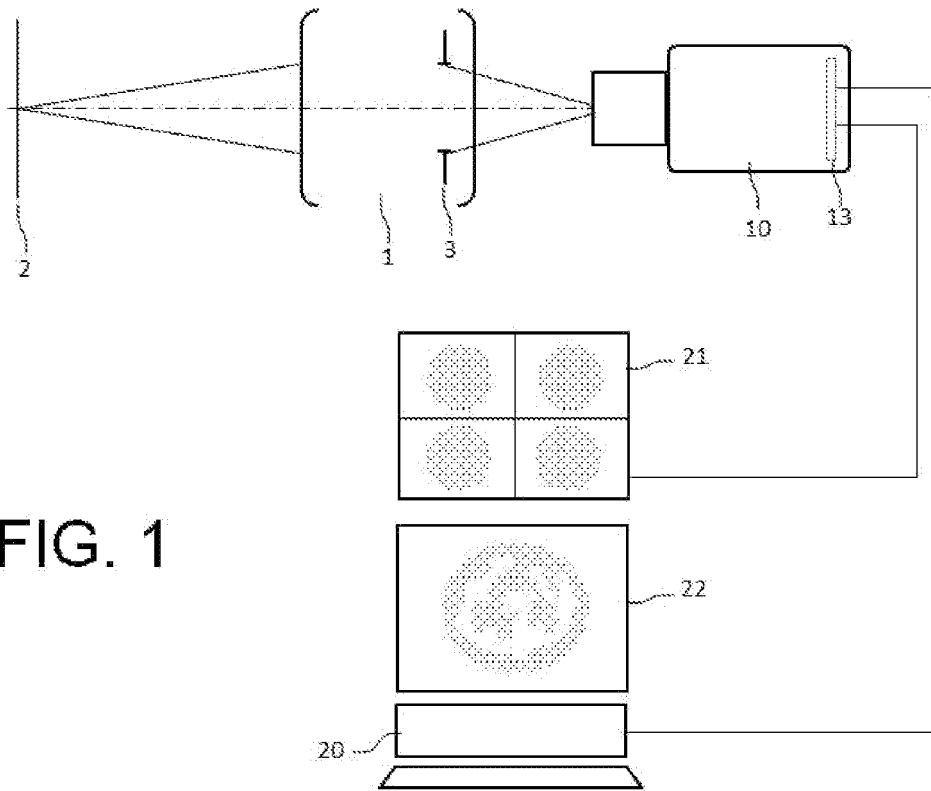


FIG. 1

[Fig. 2]

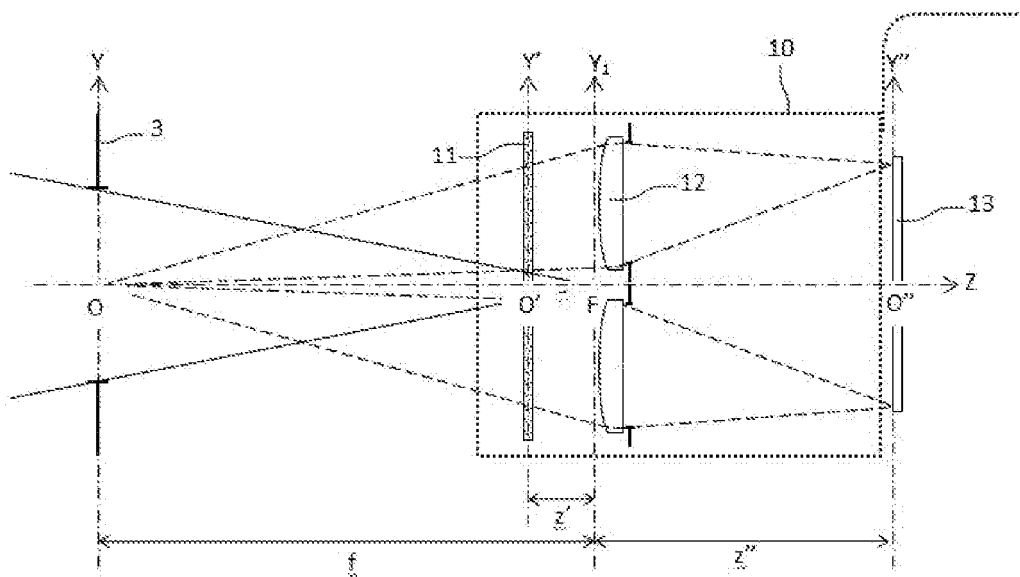


FIG. 2

[Fig. 3]

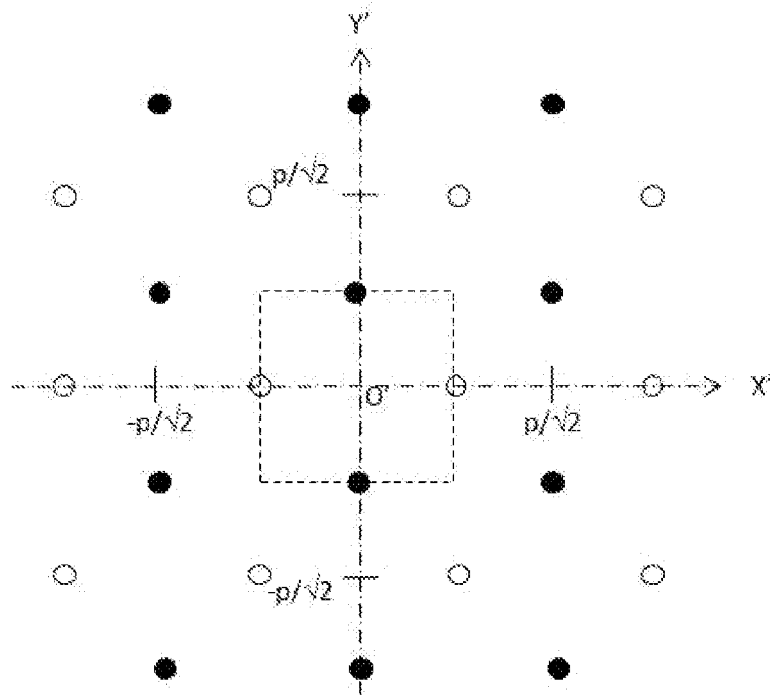


FIG. 3

[Fig. 4]

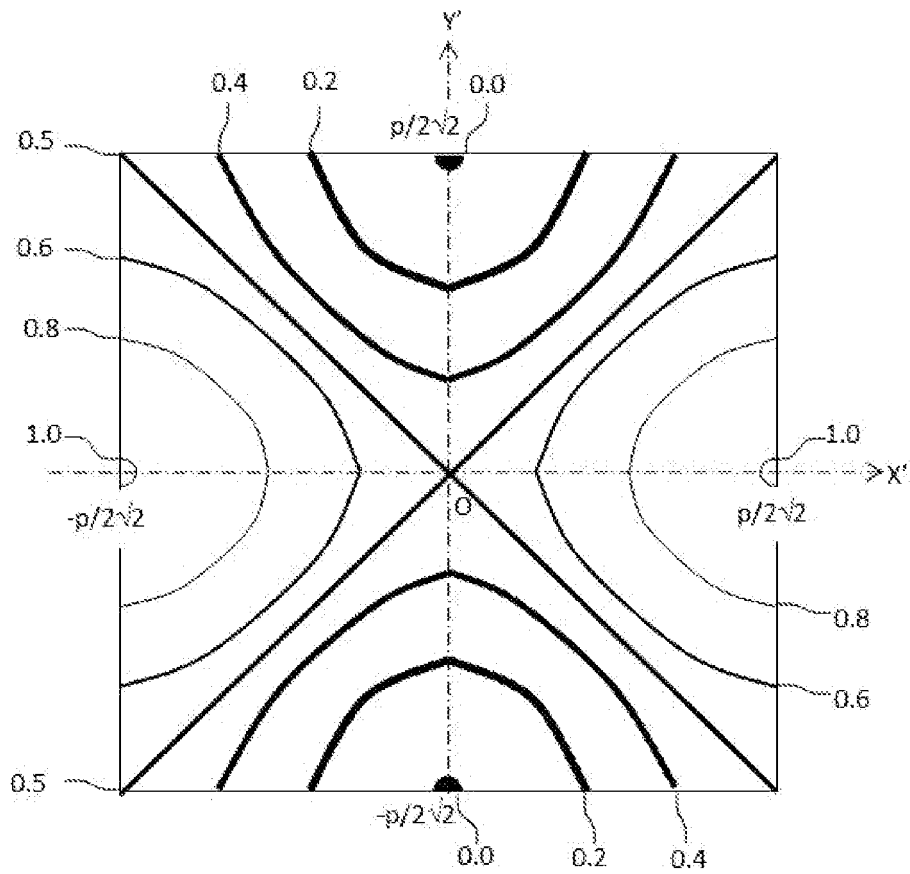


FIG. 4

[Fig. 5]

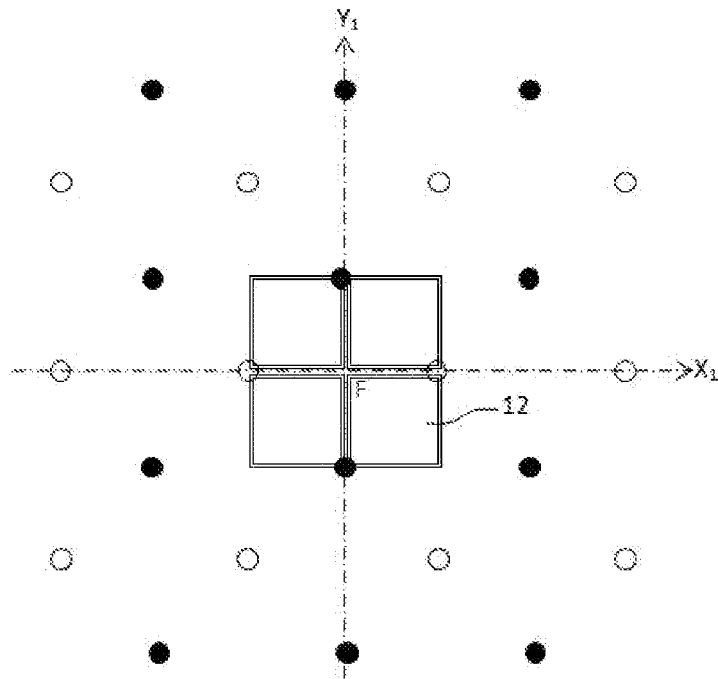


FIG. 5

[Fig. 6]

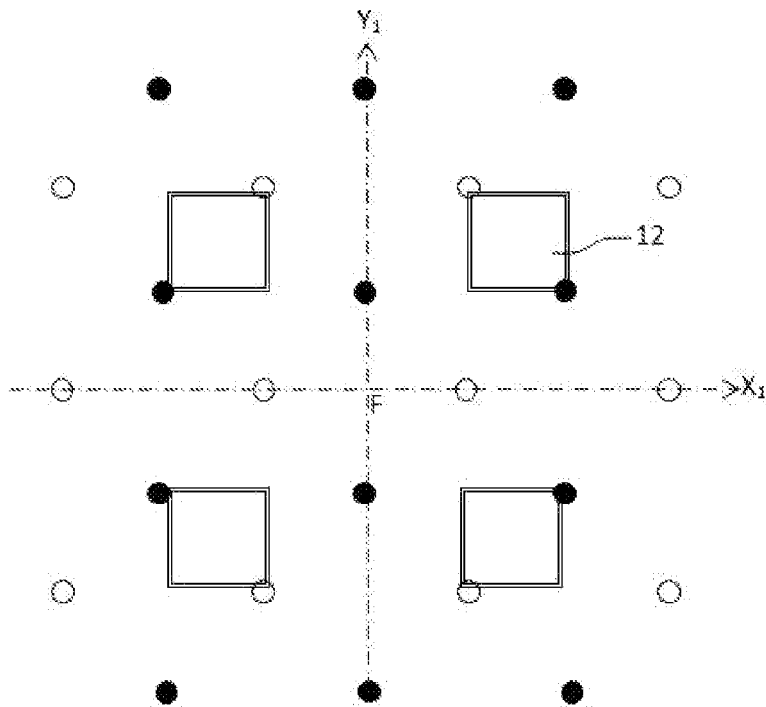


FIG. 6



[Fig. 7]

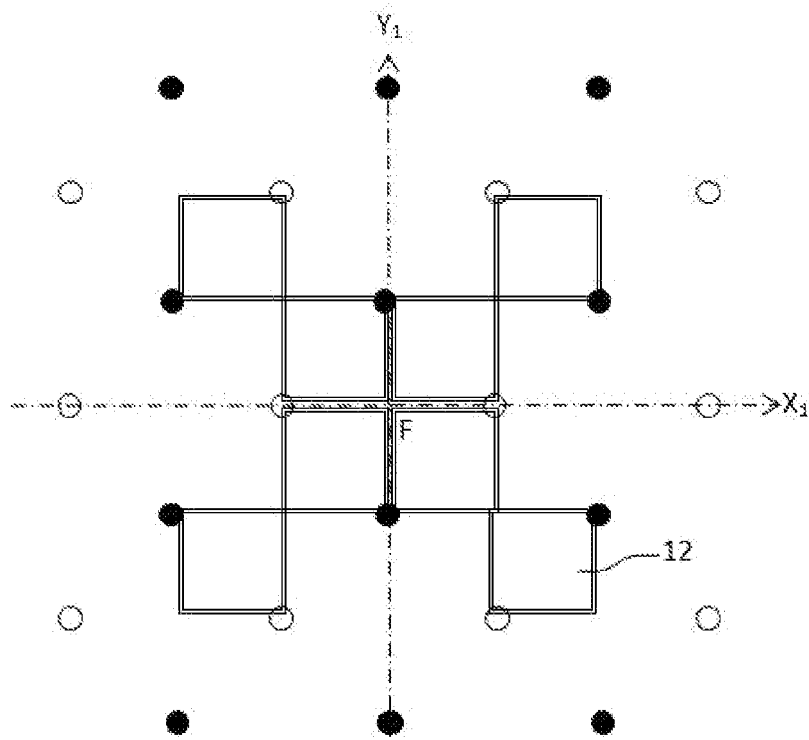


FIG. 7

[Fig. 8]

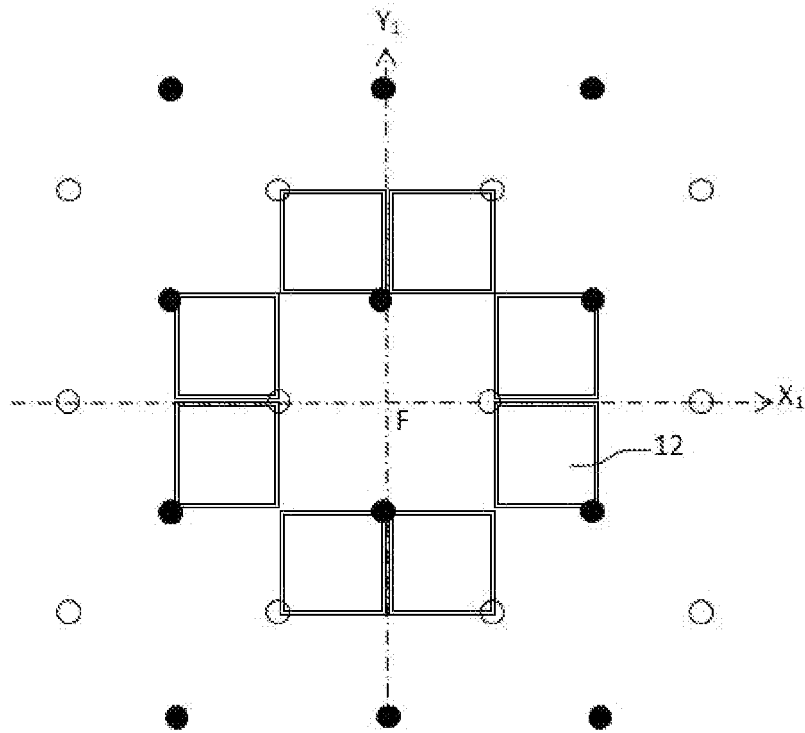


FIG. 8



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 864964  
FR 1900896

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	FRANÇOIS HÉNAULT: "Fresnel diffraction analysis of Ronchi and reverse Hartmann tests", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA A, vol. 35, no. 10, 26 septembre 2018 (2018-09-26), page 1717, XP55641933, US ISSN: 1084-7529, DOI: 10.1364/JOSAA.35.001717 * page 1718 - page 1721; figures 1b,2; tableau 1 *	1-5	G01J9/00 G02B26/00 G02B27/46 G01J1/20
A	WO 03/051189 A2 (TECHNOVISION GMBH GES FUER DIE [DE]; HEGELS ERNST [DE] ET AL.) 26 juin 2003 (2003-06-26) * page 6 - page 7; figure 2 *	1	
A	DE 198 00 844 A1 (SCHWIDER JOHANNES PROF DR [DE]) 15 juillet 1999 (1999-07-15) * figure 1 * * colonne 1, ligne 15 - colonne 2, ligne 19 * * colonne 2, ligne 43 - ligne 57 *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)  G01J
A	US 2012/074294 A1 (STREUBER CASEY T [US] ET AL) 29 mars 2012 (2012-03-29) * alinéas [0012], [0032] - [0037], [0040], [0041]; figure 1 *	1	
A	US 6 707 020 B1 (PRAUS II ROBERT W [US] ET AL) 16 mars 2004 (2004-03-16) * figures 1,2 * * colonne 2, ligne 11 - ligne 30 * * colonne 3, ligne 25 - colonne 4, ligne 53 *	1	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
14 novembre 2019		Jacquin, Jérôme	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1900896 FA 864964**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **14-11-2019**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 03051189 A2	26-06-2003	AU 2002358137 A1 WO 03051189 A2	30-06-2003 26-06-2003
-----			
DE 19800844 A1	15-07-1999	AUCUN	
-----			
US 2012074294 A1	29-03-2012	AUCUN	
-----			
US 6707020 B1	16-03-2004	AUCUN	
-----			