



## (12) FASCICULE DE BREVET

- (11) N° de publication : **MA 32069 B1** (51) Cl. internationale : **G06T 5/00; G06T 17/40**
- (43) Date de publication : **01.02.2011**

- 
- (21) N° Dépôt : **33072**
- (22) Date de Dépôt : **09.08.2010**
- (30) Données de Priorité : **15.01.2008 ES P200800126**
- (86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT : **PCT/ES2009/000031 15.01.2009**
- (71) Demandeur(s) : **UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación OTRI. Edificio Central Delgado Barreto s/n E-38200 La Laguna (Tenerife) (ES)**
- (72) Inventeur(s) : **RODRÍGUEZ RAMOS, José Manuel ; MARICHAL HERNÁNDEZ, José Gil ; ROSA GONZÁLEZ, Fernando ; PÉREZ NAVA, Fernando**
- (74) Mandataire : **ABU-GHAZALEH INTELLECTUAL PROPERTY (TMP AGENTS)**

- 
- (54) Titre : **PROCÉDÉ ET CHAMBRE D'ACQUISITION EN TEMPS RÉEL D'INFORMATIONS VISUELLES DE SCÈNES TRIDIMENSIONNELLES**
- (57) Abrégé : L'INVENTION CONCERNE UN PROCÉDÉ DESTINÉ À CALCULER LA "PILE FOCAL" ASSOCIÉE À UN ESPACE OBJET À PARTIR DE SA FONCTION PLÉNOPTIQUE, AU MOYEN D'UNE TRANSFORMÉE DE SOMME LE LONG DES PLANS RESTREINTS EN HYPERCUBES DISCRÉTISÉS, CE QUI PERMET UNE DIMINUTION CONSIDÉRABLE DU TEMPS DE CALCUL. ELLE CONCERNE ÉGALEMENT UN PROCÉDÉ DESTINÉ À AUGMENTER LA RÉOLUTION DE LA "PILE FOCAL" OBTENUE. L'INVENTION CONCERNE, EN OUTRE, DEUX PROCÉDÉS DESTINÉS À RÉCUPÉRER EN TEMPS RÉEL LES PROFONDEURS, LES MODULES ET LES PHASES DE L'AMPLITUDE COMPLEXE DU FRONT D'ONDE, RESPECTIVEMENT, DANS CHAQUE POSITION DES SURFACES D'UNE SCÈNE TRIDIMENSIONNELLE, AINSI QU'UN SYSTÈME CONÇU POUR METTRE EN OEUVRE LES PROCÉDÉS SUSMENTIONNÉS.

ABRÉGÉ

5 Procédé pour calculer le "focal stack" associé à un  
espace objet à partir de sa fonction plénoptique, en employant  
une transformée d'addition le long de plans restreints dans  
des hypercubes discrétisés, ce qui permet de diminuer  
10 considérablement le temps de calcul. On présente, en outre, un  
procédé pour augmenter la résolution du "focal stack" obtenu.  
En outre, l'invention concerne deux procédés pour récupérer en  
temps réel les profondeurs et les modules et phases de  
l'amplitude complexe du front d'onde, respectivement, dans  
chaque position des surfaces d'une scène tridimensionnelle,  
ainsi qu'un système adapté pour réaliser les procédés  
antérieurs.

PROCÉDÉ ET CHAMBRE D'ACQUISITION EN TEMPS RÉEL D'INFORMATIONS  
VISUELLES DE SCÈNES TRIDIMENSIONNELLES

DESCRIPTION

OBJET DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne un procédé pour calculer le "focal stack" associé à un volume objet, un procédé pour améliorer la résolution des images du "focal stack" obtenu, un procédé pour mesurer des distances en temps réel dans des scènes tridimensionnelles et un procédé pour mesurer  
10 tomographiquement en temps réel l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé à un front d'onde.

La présente invention permet de connaître la distance et l'amplitude complexe du champ électromagnétique dans les positions des surfaces de la scène.

15 En outre, l'invention concerne une caméra pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles dans une large gamme de volumes, caractérisé par l'utilisation d'une lentille objectif et une matrice de microlentilles située dans l'espace image de la  
20 lentille objectif, un capteur mis en place dans la focale des microlentilles (qui recueille l'image formée par celles-ci) et des moyens de traitement de calcul parallèle adaptés pour calculer le "focal stack" associé au volume objet mesuré par la caméra, et pour calculer sur celui-ci l'amplitude complexe  
25 du champ électromagnétique (module et phase) et la position tridimensionnelle des surfaces irradiantes en tout point de l'espace objet capté.

Cette invention peut être utile dans tout secteur ou application dans laquelle il est nécessaire de connaître le  
30 front d'onde: observation astronomique terrestre, ophtalmologie, holographie, etc., ainsi que dans celles ayant besoin de métrologie: scènes réelles, 3D télévision, polissage de CCDs, mécanique de l'automobile, etc.

35 DOMAINE DE LA TECHNIQUE

Optique. Traitement d'images.

#### ANTECEDENTS DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne aussi bien la nécessité  
d'obtenir une mesure tridimensionnelle de l'amplitude complexe  
du front d'onde associé à tout problème optique où la qualité  
d'image soit fondamentale (par exemple pour diagnostiquer),  
ainsi que la nécessité d'obtenir une carte des profondeurs  
suffisamment fiable et précise dans une large gamme de  
10 volumes, depuis quelques microns jusqu'à plusieurs kilomètres,  
et également avec la génération en temps réel d'information  
tridimensionnelle pour télévision 3D, cinéma 3D, médecine,  
etc.

#### 15 ETAT DE LA TECHNIQUE

L'optique adaptative, pour les présents télescopes de  
grand diamètre (GRANTECAN, Keck,...) et futurs télescopes géants  
(50 ou 100 mètres de diamètre), a pris le cap de mesurer la  
distribution tridimensionnelle de la phase atmosphérique en  
20 utilisant une forme de tomographie dénommée optique  
multiconjuguée. L'absence dans le ciel d'un nombre suffisant  
de sources ponctuelles naturelles, de telle manière qu'il y en  
ait toujours une présente dans le champ de vision de l'objet  
observé par le télescope, oblige à l'utilisation de sources  
25 ponctuelles artificielles: étoiles de Na (90 km de hauteur).

Pour pouvoir corriger, en évitant l'anisoplanatisme du  
foyer, toute l'atmosphère affectant le faisceau lumineux  
provenant de l'objet dans le ciel il est nécessaire d'utiliser  
plusieurs de ces étoiles artificielles (au moins 5). Chacune  
30 d'elles nécessite, pour être générée, un laser de très haute  
résolution, pulsé et de grande puissance, ce qui se traduit en  
une technologie énormément chère. Par ailleurs, après un coût  
aussi élevé, l'optique multiconjuguée n'est capable que de  
mesurer la phase atmosphérique associée à, tout au plus, trois  
35 couches horizontales de turbulence (avec trois capteurs de

phase en mesurant simultanément), c'est à dire, elle balaie une proportion très petite du cylindre tridimensionnel qui affecte l'image. En plus, on récupère une estimation de la phase avec des calculs si compliqués qu'ils compromettent sérieusement la correction adaptative du faisceau optique dans le temps de stabilité de l'atmosphère dans le visible (10 ms).

Cependant, les antécédents de l'invention ne se centrent pas exclusivement dans le champ de l'astrophysique. Dans le domaine de l'optique, ou l'ophtalmologie, l'intérêt principal dans la réalisation d'une tomographie de l'œil humain réside essentiellement dans l'obtention et la disposition de la part des spécialistes médicaux, d'une image claire du fond de rétine du patient, pour pouvoir réaliser les diagnostics avec une plus grande fiabilité. L'humeur aqueuse, l'humeur vitrée et le cristallin se comportent dans l'œil comme des moyens qui aberrant l'image qui peut être obtenue du fond de rétine.

Bien que pour ce cas, il n'est pas nécessaire de réaliser des mesures aussi fréquentes comme dans l'atmosphère terrestre (une toutes les 10 ms), car il s'agit d'une déformation stable, on exige en revanche une résolution tridimensionnelle suffisante pour, non seulement obtenir une bonne image de fond de rétine, mais également détecter la situation spatiale de possibles lésions oculaires.

Pour finir, et dans un autre domaine comme celui de l'image télévisuelle ou cinématographique, on a les défis relatifs à la télévision tridimensionnelle, où l'un des problèmes fondamentaux est la génération de contenus en temps réel, étant donné que les techniques sont si complexes et laborieuses qu'elles ont besoin de l'intervention humaine pendant le procédé de génération de contenus 3D pouvant être montrés par les "displays 3D" préexistants. Dans ce sens, l'implémentation optimisée sur le hardware de calcul parallèle (GPUs et FPGAs) des techniques ici proposées permet de générer des contenus tridimensionnels en temps réel.

On connaît des approches dans l'état de la technique dans les champs précités, où on a mis en place des microlentilles dans le plan image d'une lentille convergente en donnant lieu à des dispositifs et des procédés pour mesurer des paramètres d'images, nonobstant, ceux-ci n'utilisent pas ledit montage ni pour réaliser la mesure tomographique de l'aberration optique, ni pour obtenir les distances dans la scène.

Par exemple, Adelson et Wang ("*Single lens stereo with a plenoptic camera*", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, 99-106, 1992) utilisent le dispositif pour obtenir des distances avec une technique totalement différente de celle de la présente invention.

Les auteurs Ren Ng et al. ("*Light field photography with a hand-held plenoptic camera*", *Stanford Tech Report CTSR 2005-02*) utilisent la technique de "Slice" de Fourier associée à des microlentilles dans le plan image seulement pour obtenir des photographies focalisées de scènes réelles dans des rangs de quelques mètres cubes de volume, avec de la qualité apparemment supérieur à la technique habituelle de profondeur de champ. Dans ce cas, la technique proposée permet de calculer le "focal stack" si elle est appliquée à plusieurs reprises pour les distances qui couvrent le volume requis, en s'exposant à des conditions requises de calcul qui rendent impossible le traitement en temps réel.

Au long du présent mémoire descriptif on entend par "focal stack" d'une scène le volume d'image résultant lors de la prise d'un groupe d'images photographiques conventionnelles, à partir d'un même point de vue, mais en variant la distance de focalisation.

En ce qui concerne les procédés d'extraction d'information, il est connu que l'obtention d'une image photographique à partir du "light-field" (champ de lumière) ou fonction plénoptique quadridimensionnelle,  $f(u, v, x, y)$ , est possible en intégrant tous les rayons atteignant chaque point

( $x, y$ ) du capteur, en provenance de chaque point ( $u, v$ ) du plan de la lentille. Au moyen de ladite intégration on défait l'effet de capture plénoptique. C'est à dire, si lors de la capture avec les microlentilles, les rayons ont été redirigés à différentes positions spatiales, pour refaire l'image conventionnelle, ils doivent être regroupés, c'est à dire, intégrer en commun de nouveau pour une position ( $x, y$ ), ce qui provient de différentes valeurs angulaires ( $u, v$ ).

L'image obtenue par l'opérateur  $E_F(x, y) = \iint f(u, v, x, y) du dv$ , ou intégrale de formation photographique, ré-imagine l'image photographique que l'on aurait obtenue avec un capteur conventionnel focalisé sur le plan à une distance  $F$ , conjugué par rapport à la lentille objectif de l'ensemble microlentilles-capteur. Si l'on souhaite ré-imaginer sur un plan à une distance  $F' = \alpha \cdot F$ , antérieure ou postérieure à  $F$ , Ren Ng démontre, par similitude de triangles qu'il faut évaluer:

$$E_{\alpha \cdot F}(x, y) = \iint f\left(u, v, u \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x}{\alpha}, v \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y}{\alpha}\right) du dv.$$

L'évaluation de cet opérateur pour chaque distance possible  $\alpha \cdot F$  requiert  $O(N^4)$  opérations et, en conséquence, pour  $N$  plans elle requerrait  $O(N^5)$  opérations,  $N$  étant la résolution avec laquelle on échantillonne chacune des dimensions de la fonction plénoptique.

Ren Ng démontre également que si l'on calcule la transformée de Fourier 4D du "light-field", ce qui implique  $O(N^4 \log_2 N)$  opérations d'addition et multiplication complexe, les différents plans de ré-focalisation peuvent être obtenus en réalisant une rotation, tronqué à 2D et antitransformée de Fourier en 2D de la fonction transformée 4D du "light-field", chacun d'eux avec une complexité de calcul de  $O(N^2)$ ,  $O(N^2 \log_2 N)$  à ajouter au coût initial de la transformée de Fourier de la fonction 4D captée.

Il faut, en conséquence, un procédé permettant de réduire le coût de calcul du "focal stack" et, par conséquent, son temps de calcul.

5 L'antécédent le plus proche du procédé pour calculer le "focal stack" de la présente invention est la transformée rapide (ou approximative, selon l'auteur) discrète de Radon, proposée par Götz et Druckmüller ("A fast digital Radon transform - an efficient means for evaluating the Hough transform". Pattern Recognition, vol. 29, no. 4, pp. 711-718, 10 1996.), et Brady ("A Fast Discrete Approximation Algorithm for the Radon Transform". SIAM J. Comput., vol. 27, no. 1, pp. 107-119, 1998) indépendamment, qui évalue simultanément le sommateur des valeurs le long d'une série de lignes discrètes, chacune caractérisées par une pente et un déplacement par rapport à l'origine, disposées sur une grille bidimensionnelle de données, au moyen de  $O(N^2 \log_2 N)$  additions où l'évaluation 15 directe du sommateur sur chaque ligne requerrait  $O(N)$  opérations, et alors, l'évaluation pour  $N$  pentes et  $N$  déplacements requerrait  $O(N^3)$  additions.

20 Finalement, en laissant de côté les procédés pour l'obtention de l'information de la scène et en observant le système de la présente invention, Richard M. Clare et Richard G. Lane ("Wave-front sensing from subdivision of the focal plane with a lenslet array", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 22, No. 25 1, 117-125, 2005) ont proposé un système dans lequel on met en place une matrice de microlentilles juste dans le foyer de la lentille convergente, non pas dans n'importe quelle position du plan image, et au moyen duquel on obtient la phase du front d'onde seulement dans la pupille de la lentille.

30 Il est donc nécessaire un procédé permettant de déterminer la phase du front d'onde topographiquement, c'est à dire, à une distance quelconque dans le volume tridimensionnelle de l'espace objet, non seulement dans la pupille de la lentille.



## DESCRIPTION DE L'INVENTION

5 La présente invention résout la problématique précitée, en fournissant dans un premier aspect un procédé pour calculer le "focal stack" associé à une scène selon la revendication 1, procédé permettant de réduire remarquablement le coût de calcul du procédé et le temps de calcul, ce qui suppose une amélioration appréciable par rapport aux procédés connus dans l'état de la technique.

10 Un objet additionnel de la présente invention est de fournir un procédé pour mesurer des distances en scènes et un procédé pour mesurer l'amplitude complexe du champ électromagnétique de calcul optimisé et adéquats pour son calcul en parallèle.

15 La présente invention permet de:

- se limiter à une seule mesure et à un seul capteur, dans chaque temps de stabilité atmosphérique.

20 - une récupération du module et phase associés à chaque couche horizontale turbulente, c'est à dire, tomographie de toute l'atmosphère au moyen du procédé de calcul du "focal stack", en soi-même rapide en attention au nombre et type d'opérations (additions) utilisées, mais pouvant être accéléré avec une adaptation intelligente de celui-ci aux Unités de Traitement Graphique (GPU) ou aux unités de hardware reconfigurable comme les FPGA (Field Programable Gate Arrays).

25 - Éviter le besoin d'utiliser des étoiles laser artificielles, car elle peut récupérer en temps réel l'image de l'objet lors de son arrivée à l'atmosphère terrestre, car cette nouvelle technique ne nécessite pas de calibrage avec le signal ponctuel pour ensuite le déconvolutionner.

30 Le procédé pour calculer le "focal stack" de l'invention, dit Transformée SCPH ("*Summation of Constrained Planes in a Hypercube*") permet d'obtenir une série de plans d'une scène tridimensionnelle, focalisés sur différentes

positions le long de l'axe optique, en réduisant la complexité de calcul du procédé.

Le procédé pour calculer le "focal stack" de l'invention est basé sur les principes des procédés multi-échelle pour le calcul de la transformée rapide discrète de Radon, et réussi à minimiser le nombre d'opérations à réaliser au moyen de la réutilisation de résultats partiels.

Afin de réduire le coût de calcul du calcul du "focal stack", le procédé de la présente invention emploie une transformée d'addition le long de plans restreints en hypercubes discrétisés. Il faut souligner que l'intégrale de formation photographique équivaut géométriquement à l'évaluation de l'intégrale le long de plans dans une fonction dont le domaine est un hypercube de dimension 4. Entendue de la sorte, l'intégrale de formation photographique est un cas particulier de  $E_{r,r}(j,k) = \iint f(u,v, u \cdot r_1 + j, v \cdot r_2 + k) du dv$ , en ajoutant la restriction que les pentes  $r_1$  et  $r_2$  définissant les plans d'intégration sont égales pour le cas qui nous occupe, ce qui permet de réduire le nombre d'opérations à réaliser.

Le procédé pour calculer le "focal stack" proposé consiste à calculer simultanément l'addition des valeurs positionnées dans la fonction 4D discrète,  $f(u,v,x,y)$ , sur des plans tels que les coordonnées des points situés sur ceux-ci accomplissent simultanément le fait que  $x = u \cdot r + j$  et  $y = v \cdot r + k$ , sous certaines conditions de discrétisation, en réutilisant les additions partielles de points contenus par plus d'un plan discret,  $u$  et  $v$  étant les dimensions horizontale et verticale sur le plan de la lentille et  $x$  et  $y$  les dimensions horizontale et verticale sur le plan capteur, et  $j$ ,  $k$  et  $r$ , les dimensions en horizontale, verticale et profondeur du "focal stack" que l'on veut obtenir. C'est à dire, on étend l'algorithme qui calcule la transformée approximative rapide discrète de Radon, qui existait déjà pour

le cas des intégrales de ligne sur le plan, jusqu'à arriver aux intégrales d'hyperplans de 4 dimensions sur l'hypercube de 4 dimensions, avec en outre, le fait que les pentes en horizontale et en verticale sont la même.

5 On définit la transformation partielle des données, jusqu'à l'étape  $m$ , comme:

$$\begin{aligned} \tilde{f}^m(r, s, t, j, k) &= \tilde{f}^m(\overbrace{r_0, \dots, r_{m-1}}^{r: m \text{ bits}}, \overbrace{s_m, \dots, s_{n-1}}^{s: n-m \text{ bits}}, \overbrace{t_m, \dots, t_{n-1}}^{t: n-m \text{ bits}}, j, k) \\ &= \sum_{u \in \mathbb{Z}_2^m} \sum_{v \in \mathbb{Z}_2^m} f(\lambda(u, s), \lambda(v, t), l_{\lambda(r)}^m(u) + j, l_{\lambda(r)}^m(v) + k) \end{aligned}$$

où l'on considère que la fonction a des dimensions  $N \times N \times N \times N$ , avec  $n = \log_2 N$ , la fonction

10 
$$l_s^n(u_0, \dots, u_{n-1}) = l_{\lfloor s/2 \rfloor}^{n-1}(u_0, \dots, u_{n-2}) + u_{n-1} \cdot \lfloor (s+1)/2 \rfloor$$

décrit la forme discrète dans laquelle la succession de points  $(u, l_s^n(u) + d)$ , avec  $u \in [0, N)$ , unit les points  $(0, d)$  et  $(N-1, s+d)$  en formant une ligne discrète de pente  $s/(N-1)$ , et la fonction  $\lambda(u_0, \dots, u_{n-1}) = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot u_i$  rend la valeur  $\lambda(u) \in \mathbb{Z}$  correspondante au nuple binaire  $u = (u_0, \dots, u_{n-1}) \in \mathbb{Z}_2^n$ .

15 Si l'on fait équivaloir les données transformées jusqu'à l'étape 0,  $\tilde{f}^0(r, s, t, j, k)$ , avec les données capturées,  $f(s, t, j, k)$ :

$$\tilde{f}^0(r, s, t, j, k) = f(\underbrace{s, t}_{2^n}, j, k), \text{ alors:}$$

$$\tilde{f}^n(r, s, t, j, k) = \tilde{f}(\underbrace{r, j, k}_n) = \sum_{u \in \mathbb{Z}_2^n} \sum_{v \in \mathbb{Z}_2^n} f(\lambda(u), \lambda(v), l_{\lambda(r)}^n(u) + j, l_{\lambda(r)}^n(v) + k)$$

20 qui s'approche de l'intégrale de formation photographique  $E_r(j, k) = \iint f(u, v, u \cdot r + j, v \cdot r + k) du dv$ , pour un volume de  $N$  plans de profondeur.

25 De manière analogue on peut calculer d'autres  $N$  plans de profondeur pour des pentes négatives. Comme les deux semi-volumes partagent la profondeur 0, au total on obtiendrait un



focal stack composé de  $2N-1$  images ré-focalisées à différentes distances.

La formule récurrente qui cartographie deux étapes partielles  $m$  et  $m+1$ , décrit complètement le procédé, et requiert le fait d'être appliquée  $n$  fois:

5

$$\begin{aligned} \tilde{f}^{m+1} \left( \underbrace{\overbrace{r_0, \dots, r_{m-1}}^{\rho: m \text{ bits}}, r_m}_{r: m+1 \text{ bits}}, \underbrace{\overbrace{s_{m+1}, \dots, s_{n-1}}^{s: n-m-1 \text{ bits}}}_{s: n-m-1 \text{ bits}}, \underbrace{\overbrace{t_{m+1}, \dots, t_{n-1}}^{t: n-m-1 \text{ bits}}}_{t: n-m-1 \text{ bits}}, j, k \right) = \\ \tilde{f}^m(\rho, 0, s, 0, t, j, k) + \\ \tilde{f}^m(\rho, 1, s, 0, t, j + r_m + \lambda(\rho), k) + \\ \tilde{f}^m(\rho, 0, s, 1, t, j, k + r_m + \lambda(\rho)) + \\ \tilde{f}^m(\rho, 1, s, 1, t, j + r_m + \lambda(\rho), k + r_m + \lambda(\rho)) \end{aligned}$$

Il faut souligner que le domaine pour lequel est décrite la transformation partielle  $\tilde{f}^{m+1}$  est la moitié que celui requis par  $\tilde{f}^m$ , en se transformant progressivement d'un domaine 4D à un domaine 3D, dans un procédé qui requiert  $O(N^4)$  additions, ce qui se traduit par une économie de temps de calcul supérieure à 80% par rapport aux procédés actuels.

10

En suivant ce procédé, et avec les procédés ici proposés, il est possible de récupérer aussi bien des profondeurs que des modules et des phases de l'amplitude complexe du front d'onde à chaque position des surfaces de la scène, ce qui permet de scanner tridimensionnellement, complètement et en temps réel la scène, en ayant en conséquence comme résultat, une grande application dans les champs précités.

15

20

De manière avantageuse le procédé pour calculer le "focal stack" de la présente invention ne requiert pas de multiplications ni d'opérations trigonométriques, seulement des additions et sa complexité de calcul est de l'ordre  $O(N^4)$  pour un volume final qui contient  $2N-1$  plans photographiques focalisés à différentes profondeurs, à partir d'un light-field de dimension  $N^4$ .

25



Le procédé de la présente invention permet de calculer le "focal stack" pour tout un volume et avec un moindre nombre d'opérations que celles qu'utilisent les procédés pour obtenir le "focal stack" décrits dans l'état de la technique (Ren Ng) pour le calcul d'un seul plan.

Cependant, un problème qui surgit lors de la capture du light-field 4D est la nécessité d'utiliser un capteur en 2 dimensions. Pour obtenir tout le volume d'information 4D sur un capteur 2D il est nécessaire un capteur de résolution très élevée. De la sorte, pour un capteur de  $O(N^4)$  pixels il est seulement possible d'obtenir un "focal stack" composé d'images de  $O(N^2)$  pixels et par conséquent uniquement  $O(N^2)$  distances. Cette réduction de résolution d'ordre  $O(N^2)$  provoque la nécessité d'utiliser des capteurs de coût extraordinairement élevé.

Pour solutionner ce problème, on fournit, dans un deuxième aspect de la présente invention, un procédé pour améliorer la résolution des images du "focal stack" selon la revendication 2. Dans ledit procédé, il est supposé que les éléments de la scène ont de la réflectance du type Lambertienne, c'est à dire, que l'intensité émise par un point dans l'objet est indépendante de l'angle. Dans ce cas le light-field a de l'information redondante d'ordre  $O(aN^2)$ ,  $a$  étant une constante arbitraire avec  $0 < a < 1$ . Cette information redondante peut être utilisée pour augmenter la résolution des images du "focal stack".

Le procédé selon la revendication 2 permet de passer d'un "focal stack" avec des images de résolution  $O(N^2)$  à un autre de résolution  $O((1-a)N^2)$ .

Étant donné une image du "focal stack" correspondant à un plan à une distance déterminée, le procédé d'augmentation de résolution du "focal stack" comprend:

1. la rétro-projection des  $O(N^4)$  rayons du light-field à partir de ce plan en construisant une image à haute

résolution avec les positions fractionnelles de ces rayons.

2. La détermination des redondances dues à la supposition Lambertienne.

5 3. Dans cette image à résolution augmentée (avec super-résolution) apparaissent deux types de pixels: ceux pour lesquels il n'y a pas de redondances, où l'on met en place la valeur du rayon rétro-projeté, et ceux pour lesquels il existe des redondances, où l'on met en place une valeur représentative des rayons redondants comme peut l'être la moyenne.

10 En supposant  $O(aN^2)$  redondances pour chacun des  $O(N^2)$  éléments de l'image du "focal stack" original, la résolution finale de l'image du "focal stack" serait incrémentée de  $O(N^2)$  à  $O((1-a)N^2)$ .

15 Dans le contexte du présent mémoire descriptif, nous entendons par super-résolution toute augmentation dans la définition, aussi bien de l'image que de la carte de distances associée, par rapport à la résolution dans des microlentilles,  $O(N^2)$ . Sa limite maximale est donc dans le nombre de pixels  $O(N^4)$ , en obtenant avec le procédé de l'invention, de manière avantageuse, une résolution d'ordre  $O((1-a)N^4)$ .

20 Typiquement la valeur de  $a$  dépend de l'image du "focal stack" qui est considérée. Pour le calcul de distances on fixe une résolution minimale et on échantillonne à nouveau les images implicitement ou explicitement pour obtenir ladite résolution minimale.

25 Dans un troisième aspect de l'invention on présente un procédé pour mesurer des distances en temps réel dans des scènes tridimensionnelles selon la revendication 3. Ledit procédé comprend l'obtention d'une image de l'espace objet avec une caméra de phase, le calcul du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 1, l'application d'un opérateur de mesure de qualité de focalisation dans le "focal stack"

(variance, laplacien, gradient), et le calcule de l'état optimal sur un champ aléatoire de Markov.

5 On peut adapter les étapes du procédé antérieur pour son implémentation sur hardware de calcul parallèle, tel qu'une GPU ou une FPGA, ce qui donne comme résultat une optimisation encore plus avantageuse du temps de traitement.

10 Dans un quatrième aspect l'invention fournit un procédé pour mesurer tomographiquement en temps réel l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé à un front d'onde d'une scène selon la revendication 5. Ledit procédé comprend l'obtention d'une image de l'espace objet avec une caméra de phase, le calcul du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 1, qui fournit la tomographie du module carré de l'amplitude complexe du front d'onde, l'application d'un  
15 opérateur de génération des gradients de la phase de front d'onde en tout point du volume de l'espace objet, et la récupération de la phase du front d'onde du champ électromagnétique associé.

20 On peut adapter les étapes du procédé antérieur pour son implémentation sur hardware de calcul parallèle, tel qu'une GPU o une FPGA, ce qui donne comme résultat une optimisation encore plus avantageuse du temps de traitement.

25 Aussi bien dans le procédé pour mesurer des distances en temps réel dans des scènes tridimensionnelles que dans le procédé pour mesurer tomographiquement en temps réel l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé à un front d'onde, les mesures de l'espace objet sont réalisées une seule fois, c'est à dire, une seule image contient l'information suffisante pour récupérer le milieu  
30 tridimensionnel. Une telle image peut être entendue comme étant composée de 4 dimensions: deux coordonnées sur le détecteur associées à l'intérieur de chaque microlentille et deux autres coordonnées associées à la matrice de microlentilles.



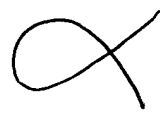
Le montage serait constitué par une seule matrice de microlentilles, en formant une image sur une surface détectrice de résolution suffisante (par exemple un dispositif CCD) qui se situe dans une position de l'espace image d'une lentille convergente, ce qui permet de réaliser des mesures tomographiques de l'espace tridimensionnel objet.

Pour finir, dans un cinquième aspect de la présente invention on fournit une caméra de phase pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles selon la revendication 7 qui comprend une lentille convergente, une matrice de microlentilles mise en place dans une position de l'espace image de la lentille convergente et qui forme une image sur une surface détectrice de résolution suffisante, et des moyens de traitement de calcul parallèle adaptés pour calculer le "focal stack" associé à l'espace objet mesuré par la caméra au moyen du procédé de la revendication 1, pour obtenir l'amplitude complexe du champ électromagnétique (module et phase) et pour obtenir la distance en toute position de l'espace objet capté.

Face aux procédés et systèmes de l'état de la technique, le procédé pour calculer le "focal stack" selon la présente invention permet de déterminer la phase du front d'onde topographiquement, c'est à dire, à une distance quelconque dans le volume tridimensionnel de l'espace objet. En outre, le procédé pour calculer le "focal stack" de la présente invention permet de caractériser le champ électromagnétique non seulement par la phase du front d'onde dans un plan, mais par l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé au front d'onde dans tout le volume.

**DESCRIPTION DES FIGURES**

Pour compléter la description suivante et afin d'aider à une meilleure compréhension des caractéristiques de l'invention, on adjoint comme partie intégrante de ladite





description un jeu de dessins où, à caractère illustratif et non pas limitatif, on a représenté ce qui suit:

Figure 1: Représentation schématique des éléments principaux de la caméra pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles selon l'invention.

Figure 2: Schéma conceptuel de l'invention appliquée à un télescope avec un grand miroir principal (1) pour la réalisation de tomographie d'atmosphère en observation astrophysique d'une étoile (8) avec une optique adaptative.

Figure 3: Schéma conceptuel d'une observation astrophysique classique d'une étoile (8) qui utilise une optique adaptative multiconjuguée avec deux couches de turbulence dans l'atmosphère (9) et (10).

#### DESCRIPTION DÉTAILLÉE D'UN MODE DE MISE EN OEUVRE PRÉFÉRÉE DE L'INVENTION

Dans un premier exemple de mise en oeuvre pratique de l'invention, on considère la mesure de la distance à laquelle se trouvent les objets d'une scène.

On considère le cas particulier de l'observation à partir de notre invention d'une scène consistante en l'intérieur d'une chambre meublée, où l'on distingue, comme composants, divers objets situés dans un rang de profondeurs à partir de 0,5 jusqu'à 4 mètres par rapport à la position de la caméra.

Dans la figure 1 on représente schématiquement la disposition d'une lentille d'ouverture (1), une matrice de microlentilles (2) et une surface détectrice (3) compris dans la caméra de phase selon l'invention. On indique en outre, la distance (5) à partir de la lentille convergente jusqu'à celle qui focalise un objet déterminé de l'espace objet, la focale (6) de chaque microlentille de la matrice de lentilles, l'angle d'inclination locale du front d'onde (7) et le déplacement sur le chemin optique (4) qu'expérimente le front

d'onde turbulent par rapport à un autre sans aberration. La caméra de l'invention comprend également des moyens de traitement non représentés sur la figure.

5 Pour conformer la caméra de l'invention pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles on utilise un capteur CCD de résolution maximale 4000x2672 modèle IPX-11M5 de Imperx. Selon le montage de la figure 1, préalablement à la CCD, on met en place une  
10 lentille objectif de relation focale identique à celle de la matrice de microlentilles postérieure (16x16 et dans un assemblage F-Nikon) qui focalisent sur la CCD en comprenant 1024 x 1024 pixels. La caméra présente dans cette disposition une ouverture angulaire de 30° en horizontal, et elle focalise dans la région centrale de la scène, à environs 2 mètres.

15 L'image détectée est traitée avec des moyens de traitement, dans cet exemple une carte graphique GPU nVidia 8800 GTX adaptée pour:

- 20 - calculer le "focal stack" au moyen du procédé pour calculer le "focal stack" de l'invention, adapté pour son implémentation optimale sur hardware de calcul parallèle;
- appliquer un opérateur de mesure de qualité de focalisation dans le "focal stack", par exemple, l'opérateur "Variance" pour estimation de la qualité de  
25 focalisation, adapté de manière optimale au même hardware de calcul parallèle; et
- récupérer les distances au moyen du calcul de l'état optimal sur un champ aléatoire de Markov, par exemple, propagation de la croyance basée sur le ré-pondérage  
30 d'arbres de Kolmogorov, implémenté de manière optimisée sur hardware de calcul parallèle.

Avec la caméra et le procédé de l'invention on obtient la carte de profondeurs de la scène.

Dans un deuxième exemple de mise en œuvre pratique de l'invention on considère la mesure de l'amplitude complexe du champ électromagnétique.

5 On considère le cas particulier d'une observation astrophysique avec un télescope de diamètre supérieur au diamètre de cohérence  $r_0$  de l'atmosphère (environ 20 cm dans le visible). La turbulence de l'atmosphère provoque une perte de résolution en l'image obtenue avec le télescope, c'est à dire, une perte de l'information de fréquences spatiales 10 élevées. Pour éviter cela, il faut connaître la forme dans laquelle la turbulence atmosphérique dégrade le front d'onde de la lumière provenant de l'étoile en étude. Pour cela, on peut utiliser comme référence des étoiles ponctuelles naturelles ou artificielles permettant de caractériser la 15 déformation que l'atmosphère introduit dans le front d'onde.

Dans la figure 3 on représente schématiquement une observation astrophysique d'une étoile (8) qui utilise une optique adaptative multiconjuguée classique avec deux couches de turbulence dans l'atmosphère. Avec une optique adaptative 20 multiconjuguée, un capteur de phase de front d'onde doit être utilisé par chaque miroir déformable conjugué avec une couche de turbulence individuelle, c'est à dire, deux capteurs de phase (WFS) différents qui doivent être alignés et mis en marche parallèlement et dans différentes positions de l'axe 25 optique. Dans la figure on représente un télescope (1) et deux capteurs de front d'onde (11) et (12) associés de manière conjuguée à chaque couche turbulente (9) et (10). Avec une optique adaptative multiconjuguée classique il est seulement possible de récupérer un nombre très faible de couches de turbulence individuelles (trois couches au maximum). La 30 complexité des calculs et le besoin de vitesse, car l'atmosphère change toutes les 10 millisecondes dans le visible, rend actuellement impossible le dépassement de la correction à seulement trois couches de turbulence 35 atmosphérique.

Avec la présente invention, selon la conception montrée dans la figure 1, et dont le fonctionnement dans ce cas est montré dans la figure 2, seulement un capteur est utilisé, mis en place dans une seule position de l'axe optique.

5 Sur la figure 2 on présente schématiquement un système selon l'invention pour réaliser une tomographie d'atmosphère lors d'une observation astrophysique d'une étoile (8) avec une optique adaptative. Les couches de turbulence individuelles dans l'atmosphère correspondent à (9) et (10).  
10 Dans ce cas, le propre télescope (1) décrit ci-dessus agit en tant que lentille objectif. Dans son espace image est mis en place un réseau de microlentilles (2) (32x32, assemblage C) qui focalise sur une caméra (3) ANDOR modèle IXON 512x512 pixels. La caméra de phase de l'invention permet de balayer le  
15 cylindre complet de turbulence atmosphérique (13) qui affecte l'image finale du télescope. Les données sont collectées et traitées au moyen d'une FPGA modèle ML501 de Virtex préalablement adaptée pour réaliser au moyen du procédé suivant:

- 20 - le calcul du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 1, où la racine carrée du "focal stack" fournit directement le module de l'amplitude complexe du champ électromagnétique en tout point du volume de l'espace objet,
- 25 - l'application d'un opérateur de génération des gradients de la phase de front d'onde en tout point du volume de l'espace objet (opérateur de Clarke et Lane, par exemple), et
- 30 - la récupération de la phase du front d'onde du champ électromagnétique associé, par exemple, au moyen du procédé avec un développement en exponentielles complexes, le développement en fonction de polynômes de Zernike ou l'algorithme de Hudgin.

35 A la différence des techniques antérieures, dans le procédé de l'invention l'opérateur de génération des gradients

de la phase de front d'onde s'applique localement, au lieu d'à l'image plénoptique dans son ensemble.

5 Une seule mesure, traitée postérieurement comme il a été décrit, permet d'obtenir en temps réel la carte tridimensionnelle de turbulences (amplitude complexe du front d'onde) associée à toute la colonne d'atmosphère qui affecte l'observation avec notre télescope et la hauteur à laquelle se trouvent ces couches de turbulence, ainsi que la distance et le profile tridimensionnel si on utilisait une étoile laser artificielle.

10

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour calculer un "focal stack" associé à un espace objet à partir de sa fonction plénoptique discrète,  $f(s,t,j,k)$ , qui comprend l'évaluation de l'intégrale de formation photographique comme une addition le long de plans dans un hypercube 4D, ladite évaluation de l'intégrale de formation photographique comprenant à son tour les étapes suivantes:

faire équivaloir au début du calcul les données capturés,  $f(s,t,j,k)$ , avec les données transformées jusqu'à l'étape 0,  $\tilde{f}^0(r,s,t,j,k)$ , c'est à dire:  
 $\tilde{f}^0(r,s,t,j,k) = f(\underbrace{s,t}_{2^n}, j,k)$ ; et

appliquer à la suite  $n = \log_2 N$  fois la transformation partielle suivante:

$$\tilde{f}^{m+1}(\underbrace{r_0, \dots, r_{m-1}, r_m}_{r: m+1 \text{ bits}}, \underbrace{s_{m+1}, \dots, s_{n-1}}_{s: n-m-1 \text{ bits}}, \underbrace{t_{m+1}, \dots, t_{n-1}}_{t: n-m-1 \text{ bits}}, j, k) =$$

$$\tilde{f}^m(\rho, 0, s, 0, t, j, k) +$$

$$\tilde{f}^m(\rho, 1, s, 0, t, j + r_m + \lambda(\rho), k) +$$

$$\tilde{f}^m(\rho, 0, s, 1, t, j, k + r_m + \lambda(\rho)) +$$

$$\tilde{f}^m(\rho, 1, s, 1, t, j + r_m + \lambda(\rho), k + r_m + \lambda(\rho))$$

2. Procédé pour améliorer la résolution des images du "focal stack" obtenu au moyen du procédé selon la revendication 1, qui comprend les étapes suivantes:

étant donné une image du "focal stack" à une distance déterminée, rétroprojeter les  $O(N^4)$  rayons du light-field, en construisant une image de haute résolution avec les positions fractionnées de ces rayons, déterminer les redondances qui résultent du fait de supposer que les éléments de la scène ont une réflectance de type Lambertienne, et



dans les positions du "focal stack" avec super-résolution où il n'y a pas de redondances mettre en place la valeur du rayon rétroprojeté et où il y a des redondances mettre en place une valeur représentative des rayons redondantes, comme peut l'être la moyenne.

5

- 3. Procédé pour mesurer des distances en temps réel dans des scènes tridimensionnelles qui comprend les étapes suivantes:

10

- obtenir une image de l'espace objet avec une caméra de phase,

- calculer le "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 1,

15

- appliquer un opérateur de mesure de qualité de focalisation dans le "focal stack", et

- calculer l'état optimal sur un champ aléatoire de Markov.

- 4. Procédé pour mesurer des distances en temps réel dans des scènes tridimensionnelles selon la revendication 3 qui, en outre, comprend l'amélioration de la résolution des images du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 2.

20

- 5. Procédé pour mesurer tomographiquement en temps réel l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé à un front d'onde qui comprend les étapes suivantes:

25

- obtenir une image de l'espace objet avec une caméra de phase,

- calculer le "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 1, où la racine carrée du "focal stack"

30

- fournit directement le module de l'amplitude complexe du champ électromagnétique en tout point du volume de l'espace objet,

- appliquer un opérateur de génération des gradients de la phase de front d'onde en tout point du volume de

35

- l'espace objet, et

récupérer la phase du front d'onde du champ électromagnétique associé.

- 5 6. Procédé pour mesurer tomographiquement en temps réel l'amplitude complexe du champ électromagnétique associé à un front d'onde selon la revendication 5 qui, en outre, comprend l'amélioration de la résolution des images du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 2.
- 10 7. Caméra de phase pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles qui comprend
- 15 une lentille convergente,  
une matrice de microlentilles mise en place dans une position de l'espace image de la lentille convergente et qui forme une image sur une surface détectrice de résolution suffisante, et
- 20 des moyens de traitement de calcul parallèle adaptés pour
- calculer le "focal stack" associé à l'espace objet mesuré par la caméra au moyen du procédé de la revendication 1,
  - obtenir l'amplitude complexe du champ électromagnétique (module et phase) et
  - obtenir la distance en toute position de
- 25 l'espace objet capté.
- 30 8. Caméra de phase pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles selon la revendication 7, dans laquelle les moyens de traitement sont adaptés pour améliorer la résolution des images du "focal stack" au moyen du procédé de la revendication 2.
- 35 9. Caméra de phase pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles selon la revendication 7, dans laquelle les moyens de traitement sont adaptés pour obtenir la distance en



toute position de l'espace objet au moyen du procédé de la revendication 3.

5

10. Caméra de phase pour la saisie en temps réel de l'information visuelle de scènes tridimensionnelles selon la revendication 7, dans laquelle les moyens de traitement sont adaptés pour obtenir l'amplitude complexe du champ électromagnétique au moyen du procédé de la revendication 5.



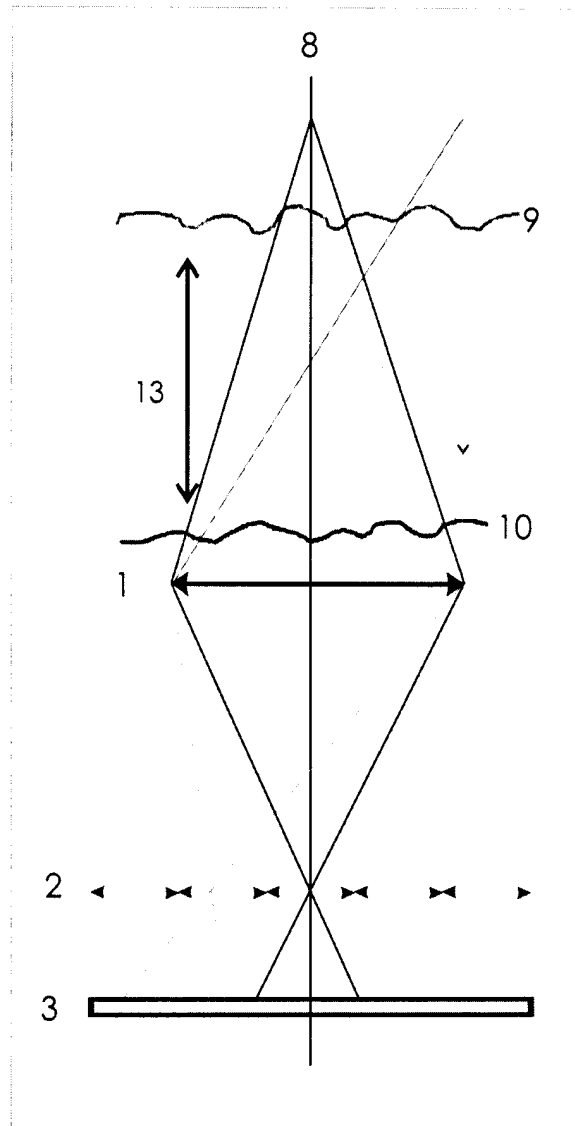


Figure 2

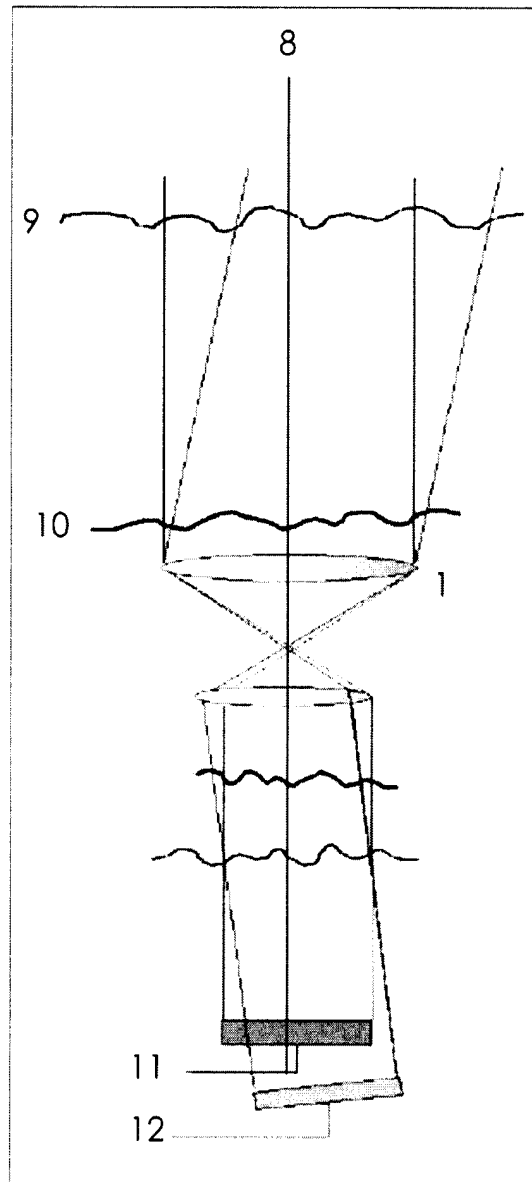


Figure 3