



(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2004/12/29

(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2005/08/11

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2014/07/08

(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2006/06/16

(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2004/003401

(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2005/073912

(30) Priorité/Priority: 2003/12/31 (FR0315628)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G06T 5/50* (2006.01)

(72) Inventeurs/Inventors:

BERIER, FREDERIC, FR;
PERCHANT, AYMERIC, FR

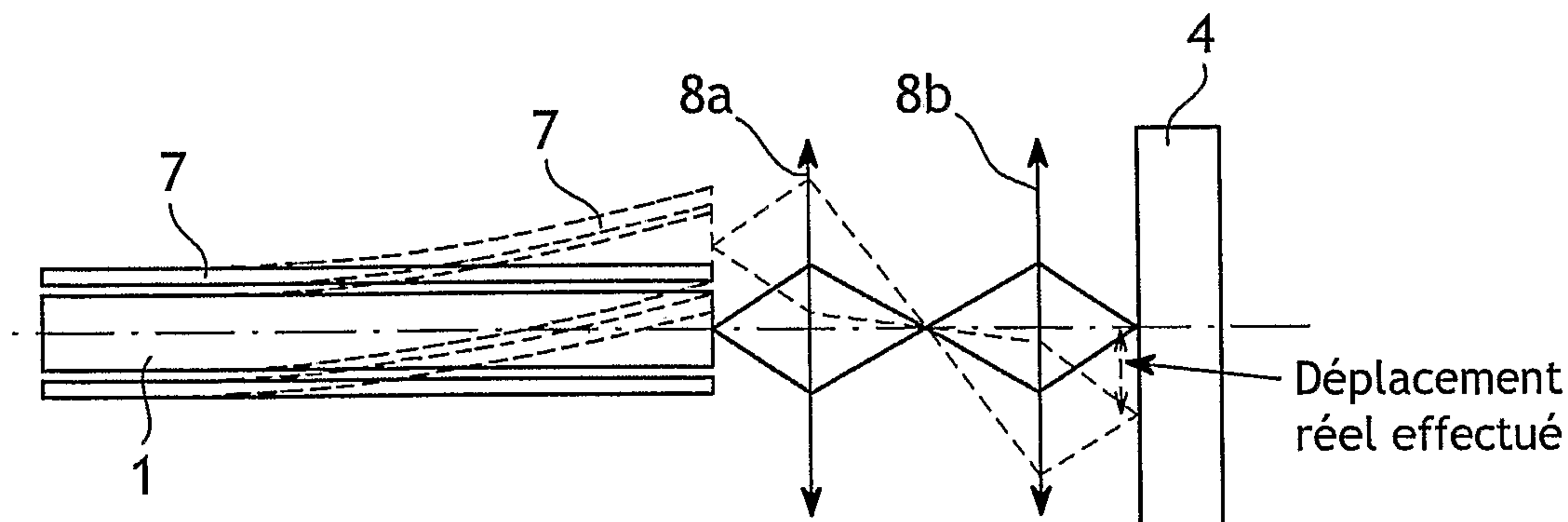
(73) Propriétaire/Owner:

MAUNA KEA TECHNOLOGIES, FR

(74) Agent: FETHERSTONHAUGH & CO.

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME DE SUPER-RESOLUTION D'IMAGES CONFOCALES ACQUISES A TRAVERS UN GUIDE D'IMAGE, ET DISPOSITIF UTILISE POUR LA MISE EN OEUVRE D'UN TEL PROCEDE

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR SUPER-RESOLUTION OF CONFOCAL IMAGES ACQUIRED THROUGH AN IMAGE GUIDE, AND DEVICE USED FOR IMPLEMENTING SUCH A METHOD



(57) Abrégé/Abstract:

L'invention concerne un procédé pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image dont l'extrémité distale est associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation. Selon l'invention, pour une position donnée de la tête optique, ce procédé comprend les étapes de : réalisation d'une pluralité d'acquisitions à travers le guide d'image, chaque acquisition étant réalisée pour un décalage spatial donné de ladite extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique qui reste fixe ; transformation des données de chaque acquisition en un nuage de points ; recalage de chaque nuage de points par rapport à un nuage de points pris comme référence ; superposition des nuages de points ainsi recalés ; et reconstruction d'une image finale à partir de cette superposition. Avantageusement, on utilise un tube piézoélectrique commandé disposé autour de l'extrémité distale du guide d'image pour déplacer ce dernier.

(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
11 août 2005 (11.08.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/073912 A1(51) Classification internationale des brevets⁷ : **G06T 5/50**(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/003401(22) Date de dépôt international :
29 décembre 2004 (29.12.2004)

(25) Langue de dépôt : français

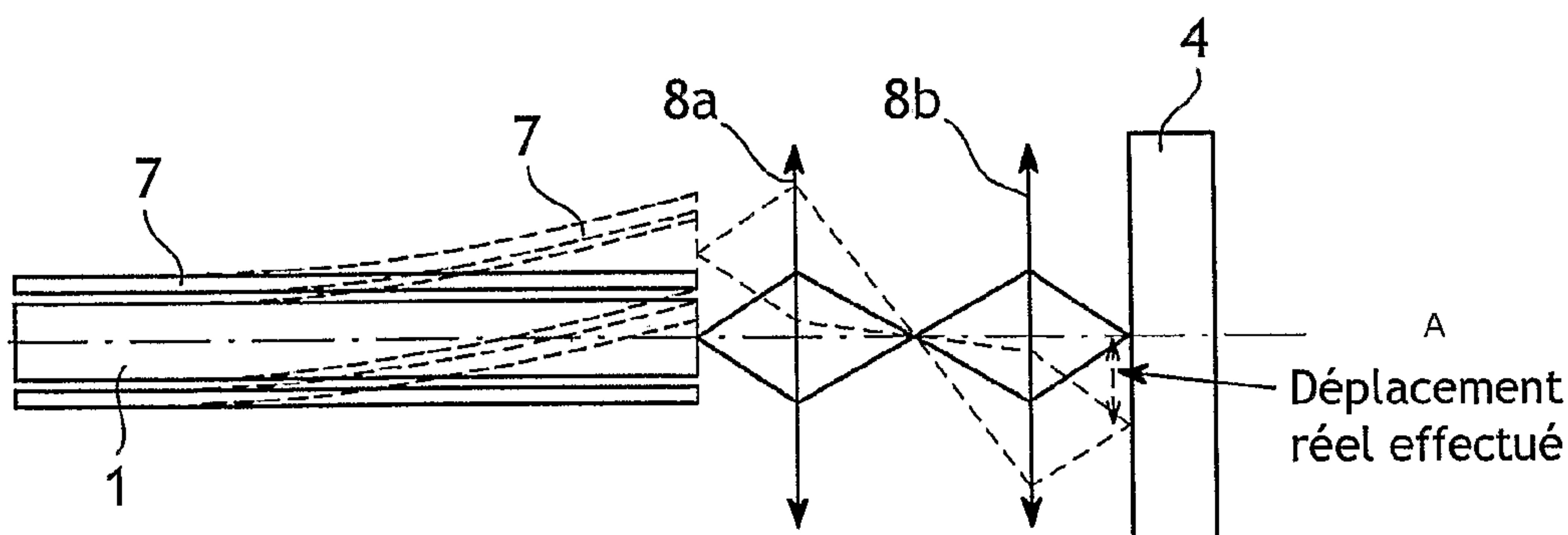
(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0315628 31 décembre 2003 (31.12.2003) FR(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
MAUNA KEA TECHNOLOGIES [FR/FR]; 9, rue
d'Enghien, F-75010 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BERIER,**Frédéric [FR/FR]; 66, rue de Strasbourg, F-92400
Courbevoie (FR). **PERCHANT, Aymeric** [FR/FR]; 110,
boulevard Blanqui, F-75013 Paris (FR).(74) Mandataires : **PONTET, Bernard** etc.; Pontet Allano &
Associés Selarl, 25, rue Jean Rostand, Parc Club Orsay
Université, F-91893 Orsay Cedex (FR).(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR SUPER-RESOLUTION OF CONFOCAL IMAGES ACQUIRED THROUGH AN IM-
AGE GUIDE, AND DEVICE USED FOR IMPLEMENTING SUCH A METHOD(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME DE SUPER-RESOLUTION D'IMAGES CONFOCALES ACQUISES A TRAVERS UN
GUIDE D'IMAGE, ET DISPOSITIF UTILISE POUR LA MISE EN OEUVRE D'UN TEL PROCEDE

A ... REAL SHIFT PERFORMED

(57) Abstract: The invention concerns a method for increasing the resolution of confocal images acquired through an image guide whereof the distal end is associated with an optical head for focusing the laser beam emitted by the image guide in an observation object. The invention is characterized in that for a given position of the optical head, said method comprises the following steps: producing a plurality of acquisitions through the image guide, each acquisition being produced for a specific spatial shift of said distal end of the guide image relative to the optical head which remains stationary; transforming the data of each acquisition into a point cloud; registering each scatter plot relative to a point cloud taken as reference; superimposing the thus registered point clouds; and reconstructing a final image from said superimposition. Advantageously, a controlled piezoelectric tube is used arranged about the distal end of the image guide to shift the latter.

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/073912 A1

WO 2005/073912 A1

(84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrégé :** L'invention concerne un procédé pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image dont l'extrémité distale est associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation. Selon l'invention, pour une position donnée de la tête optique, ce procédé comprend les étapes de : réalisation d'une pluralité d'acquisitions à travers le guide d'image, chaque acquisition étant réalisée pour un décalage spatial donné de ladite extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique qui reste fixe ; transformation des données de chaque acquisition en un nuage de points ; recalage de chaque nuage de points par rapport à un nuage de points pris comme référence ; superposition des nuages de points ainsi recalés ; et reconstruction d'une image finale à partir de cette superposition. Avantagusement, on utilise un tube piézoélectrique commandé disposé autour de l'extrémité distale du guide d'image pour déplacer ce dernier.

PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE SUPER-RÉSOLUTION D'IMAGES CONFOCALES ACQUISES À TRAVERS UN GUIDE D'IMAGE, ET DISPOSITIF UTILISÉ POUR LA MISE EN ŒUVRE D'UN TEL PROCÉDÉ

5 **Domaine de l'invention**

La présente invention concerne un procédé et système de super-résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image, ainsi qu'un dispositif utilisé pour la mise en œuvre d'un tel procédé.

Elle trouve une application particulièrement intéressante dans le domaine de l'imagerie médicale. Toutefois l'invention est d'un cadre plus large puisqu'elle peut s'appliquer à tout domaine dans lequel on réalise de l'imagerie au moyen d'un guide composé d'une pluralité de fibres optiques, tel que par exemple dans le domaine d'observation de l'intérieur d'un dispositif manufacturé.

15 **Contexte de l'invention**

Le guide d'image permet d'obtenir une image. Un tel dispositif permet de déporter le balayage laser, la source lumineuse et le récepteur loin de l'objet à observer. Par exemple dans un système à balayage laser avec obtention d'une image confocale, le guide d'image est un assemblage de plusieurs milliers de fibres optiques dont l'arrangement spatial est identique en entrée et en sortie.

L'extrémité distale, c'est à dire proche de l'objet à observer donc loin de la source lumineuse, est associée à une tête constituée d'optiques afin de focaliser le faisceau laser dans l'objet à observer. Un tel guide d'image permet d'observer l'objet en profondeur, avec une résolution latérale et un champ d'observation qui dépendent du grandissement des optiques, de la distance inter-cœur du guide d'image et du diamètre du guide. En modifiant le grandissement, on peut faire varier la résolution, au détriment du champ. De la même façon, un guide d'image similaire, mais avec une distance inter-cœur plus petite permet d'obtenir les mêmes résultats. Dans les deux cas, lorsque la résolution est plus petite, le champ imagé diminue également.

Un guide d'image est une structure fixe dont le rapport entre la surface utile et le nombre de cœurs présents définit la résolution du système. Pour un même champ imagé, et donc une même surface de guide d'image, la distance inter-cœur entre fibres ne peut pas être réduite à cause de contraintes physiques et technologiques. D'abord des

contraintes de fabrication rentrent en jeux. Puis des contraintes physiques liées à la diaphonie du guide, et aux propriétés optiques des fibres permettant de guider la lumière autour des longueurs d'ondes visibles.

Ainsi les limites physiques de guidage par paquet de fibres optiques ne permettent pas d'obtenir une meilleure résolution à grandissement et à champ fixe.

Dans de nombreuses applications de l'imagerie confocale fibrée, la recherche d'une meilleure résolution est primordiale. Dans une application médicale par exemple, la vision d'une cellule ou de composants de la cellule requiert une résolution qui peut aller au-delà des limites physiques de cette technologie.

Il existe de nombreux travaux de super-résolution réalisés à partir d'une caméra classique, où le schéma d'échantillonnage est régulier et disposé suivant une grille carrée ou rectangulaire. Ces travaux utilisent massivement la régularité spatiale de l'échantillonnage. On connaît notamment des travaux sur la super-résolution où l'échantillonnage issu d'un ensemble d'acquisitions est un échantillonnage entrelacé. On peut par exemple citer les publications suivantes :

H. Shekarforoush and R. Chellappa. *"Data-driven multi-channel super-resolution with application to video sequences"*. Journal of the Optical Society of America A, 16(3):481--492, Mar. 1999.;

R Kornprobst, R. Peeters, T Vieville, G. Malandain, S. Mierisova, S. Sunaert, and O. Faugeras and R Van Hecke; *"Superresolution in mri and its influence in statistical analysis"*; Technical Report nO 4513, INRIA, July 2002; et

S. Lertrattanapanich and N. K. Bose; *"High resolution image formation from low resolution frames using delaunay triangulation"* ; IEEE Transactions on Image Processing, vol. 11 (nO 12), December 2002.

On connaît enfin des travaux décrivant un système où le mouvement entre plusieurs vues est assez libre et produit un échantillonnage véritablement irrégulier. La fonction de transfert du système décrit est spatialement variante, et le rapport entre la largeur de la fonction de transfert et la distance séparant les points d'échantillonnage n'est pas constant sur l'acquisition, ce qui a pour conséquence la prise en compte des optiques du système, donc une résolution assez complexe. Un tel système est notamment divulgué dans les documents suivants :

A. Patti, M. Sezan, and M. Tekalp; *"Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time"*; IEEE Trans. on Image Processing, pages 1064-1078, August 1997; et

Andrew J. Patti and Yucel Altunbasak; *"Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants"*; IEEE Transactions on Image Processing, 10(1) :179-186, January 2001.

La présente invention a pour but d'augmenter la résolution d'une image acquise à travers un guide d'image. Un autre but remarquable de l'invention est d'appliquer le concept de super-résolution à un guide d'image.

10 L'invention a encore pour but d'améliorer la résolution d'une image à champ constant acquise à travers un guide d'image en augmentant le nombre de points de mesure par unité de surface.

Résumé de l'invention

15 Selon un aspect large et englobant, l'invention vise un procédé pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une
20 extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, où pour une position donnée de la tête optique, le procédé comprend: réalisation d'une pluralité d'acquisitions à travers le guide d'image, chaque acquisition étant réalisée pour un décalage spatial donné de l'extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique ; transformation des données de chaque
25 acquisition en un nuage de points pondéré par la puissance optique mesurée sur l'objet d'observation à travers chaque fibre optique du guide d'image ; recalage de chaque nuage de points par rapport à un nuage de points pris comme référence ; superposition des nuages de points ainsi recalés ; et reconstruction d'une image finale à partir de cette superposition.

30 Avec le procédé selon l'invention, on réalise une acquisition redondante d'un même objet avant une étape de reconstruction de l'image finale. Pour une position donnée de la tête optique, on réalise plusieurs acquisitions, chaque acquisition correspondant à une position donnée du guide d'image.

Pour toute la suite de la description, l'étape de recalage de nuage de points est un abus de langage pour signifier qu'en fait on traite chaque nuage de points de façon à recaler les images correspondant à ces nuages de points, sans forcément reconstruire ces images.

5 En particulier, une seule acquisition à travers le guide d'image est équivalente à une acquisition sur une grille irrégulière (qui est l'emplacement des fibres), appelé dans la suite échantillonnage de l'objet. Le déplacement du guide d'image dans le tube revient à déplacer le schéma d'échantillonnage qui est l'arrangement des fibres individuelles dans le guide d'image. Avec deux acquisitions, on obtient ainsi deux échantillonnages du même
10 objet, mais décalés spatialement. En les superposant, on obtient un échantillonnage avec deux fois plus de points de mesure. En multipliant l'expérience, on obtient un nuage de points d'échantillonnage plus important. L'échantillonnage résultant est irrégulier et doit être reconstruit sous forme d'une image.

 L'étape de la transformation des données acquises peut être suivie de l'application
15 d'un filtre pour éliminer des artefacts dus à la présence du guide d'image. Ce filtre peut consister en un procédé de traitement d'image acquise au moyen d'un guide constitué par une pluralité de fibres optiques. Plus précisément, pour chaque fibre optique, on isole sur l'image acquise (les données brutes) une zone correspondant à cette fibre optique, puis on utilise les informations de cette zone pour estimer la puissance transmise par cette fibre, et
20 la puissance provenant de l'objet observé via cette même fibre. Une représentation de l'objet observé est alors un nuage de points pondéré que l'on peut reconstruire sous forme d'une image par interpolation dudit nuage de points pondéré sur une grille carrée. Une telle transformation (estimation de la puissance + interpolation) permet d'éliminer le motif dû aux fibres optiques.

25 Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, l'étape de recalage comporte les étapes suivantes :

- correction des distorsions géométriques,
- reconstruction d'une image de référence désignée par image fixe par interpolation d'un nuage de points de référence dit nuage de points fixe,
- 30 - pour chaque autre nuage de points, désigné par nuage de points mobile, reconstruction d'une image dite mobile, puis optimisation d'une erreur quadratique moyenne calculée entre ladite image mobile et ladite image fixe.

Avantageusement, on calcule l'erreur quadratique moyenne en ne considérant que les pixels correspondant aux points desdits nuages de points mobiles.

L'algorithme d'interpolation est par exemple une suite d'approximations B-splines itérative notamment divulgué dans le document suivant : Seungyong Lee, George Wolberg, and Sung Yong Shin; *"Scattered data interpolation with multilevel b-splines"* ; IEEE transactions on visualization and computer graphics, 3(3), July-September 1997.

Avantageusement, le nuage de points de référence peut correspondre à une position du guide d'image au repos.

Selon l'invention, l'étape de recalage peut par exemple consister à recaler chaque nuage de points en fonction de distances de décalages prédéterminées obtenues par une étape d'étalonnage des déplacements du guide d'image.

De préférence, à chaque acquisition, pour décaler le guide d'image par rapport à la tête optique, on applique au moins une tension sur au moins une bande piézoélectrique, qui est au moins solidaire de l'extrémité distale de ce guide d'image. A titre d'exemple, on utilise quatre bandes constituant un tube piézoélectrique qui entoure au moins l'extrémité distale du guide d'image, et on applique, pour chaque déplacement de l'extrémité distale du guide d'image, une paire de tensions opposées sur respectivement deux bandes opposées. Par ailleurs, le décalage spatial est obtenu par un mouvement sensiblement de translation latérale de l'extrémité distale du guide d'image selon deux directions orthogonales ou au moins non colinéaires.

Avantageusement, on peut réaliser l'étape d'étalonnage en appliquant les étapes suivantes sur un nombre limité de nuages de points obtenus par acquisition d'une mire de référence disposée à la place dudit objet d'observation :

- correction des distorsions géométriques,
- reconstruction d'une image de référence, désignée par image fixe, par interpolation d'un nuage de points de référence dit nuage de points fixe,
- pour chaque autre nuage de points, désigné par nuage de points mobile, reconstruction d'une image dite mobile, puis optimisation d'une erreur quadratique moyenne calculée entre ladite image mobile et ladite image fixe,
- élaboration d'un modèle linéaire décrivant la distance de décalage obtenue entre image fixe et image mobile en fonction de la tension appliquée sur la bande piézoélectrique pour réaliser ce décalage.

L'étalonnage permet de valider un modèle de déplacements linéaires en fonction de la tension appliquée et d'estimer un coefficient de décalage en fonction des mesures. Les nuages de points ultérieurs sont alors recalés en utilisant ce modèle linéaire.

5 Par ailleurs, on peut réaliser l'étape de reconstruction de l'image finale au moyen d'un algorithme dit d'approximation B-splines itérative pour lequel la superposition est considérée comme un nuage de points irréguliers. Cet algorithme possède un bon comportement mathématique, une bonne stabilité, et un coût raisonnable en temps de calcul.

10 Le problème de la reconstruction à partir de plusieurs acquisitions est le même que celui de la reconstruction ne connaissant qu'une seule acquisition avec un système non linéaire. On suppose ici que la fonction de transfert équivalente du système est spatialement variante, et que l'échantillonnage est irrégulier.

L'étape de reconstruction de l'image finale peut être suivie d'une étape de déconvolution de l'image finale si l'échantillonnage ainsi synthétisé est redondant.

15 Suivant un autre aspect large et englobant, l'invention vise un dispositif pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques et un tube piézoélectrique entourant le guide d'image et solidaire du guide d'image, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans
20 chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, la tête optique comprenant des moyens optiques solidaires de cette tête optique, le tube piézoélectrique étant à l'extrémité distale du guide d'image de façon à spatialement décaler l'extrémité distale par
25 rapport à la tête optique en réponse à une consigne de décalage.

Le tube piézoélectrique est avantageusement constitué d'au moins quatre bandes céramiques indépendantes occupant chacune un quart du tube. Les faces interne et externe de chaque bande peuvent être recouvertes de matériau métallique, tel que l'argent, de sorte que l'application de tensions opposées sur deux bandes opposées
30 respectivement, décale l'extrémité distale du tube en utilisant l'effet piézoélectrique transversal. Plus précisément, les bandes céramiques peuvent être commandées deux par deux dans deux directions orthogonales.

Suivant un autre aspect large et englobant, l'invention vise un système pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques et un tube piézoélectrique entourant le guide d'image et solidaire du guide d'image, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans
5 chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, où pour une position donnée de la tête optique, le système comprend : des moyens pour réaliser une pluralité
10 d'acquisitions à travers le guide d'image ; des moyens pour spatialement décaler, à chaque acquisition, l'extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique ; des moyens pour transformer des données de chaque acquisition en un nuage de points pondéré par la puissance optique mesurée sur l'objet à travers chaque fibre optique du guide d'image ; des moyens pour recalcr chaque nuage de points ; des moyens pour superposer les
15 nuages de points ainsi recalés, et des moyens pour reconstruire une image finale à partir de cette superposition.

Brève description des dessins

La présente invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la
20 lumière de la description qui va suivre d'un exemple de réalisation, description faite en référence aux dessins sur lesquels :

- La figure 1 est une vue schématique éclaté du système global selon l'invention ;
- La figure 2 est une vue schématique du tube piézoélectrique entourant le guide d'image ;
- 25 - La figure 3 est une vue schématique illustrant le déplacement de l'extrémité du guide d'image ;
- La figure 4 est une vue schématique illustrant une superposition irrégulière de nuages de points ; et
- La figure 5 est un schéma blocs illustrant le principe de recalage des nuages de
30 points.

Description détaillée des réalisations de l'invention

Sur la figure 1 on voit un faisceau ordonné de fibres optiques souples (notamment plusieurs dizaines de milliers) formant un guide d'image 1 avec, sur son extrémité proximale, une source lumineuse 2 et un système d'injection de fibres permettant d'illuminer les fibres une à une et, sur son extrémité distale, une tête optique 3 permettant de focaliser le faisceau sortant de la fibre illuminée en un point situé à une profondeur donnée de l'objet observé 4. Le système d'injection comprend plusieurs éléments optiques 5 précédés d'un système de balayage de fibres 6, tel qu'un déviateur, permettant de balayer les fibres une à une à très grande vitesse. Chaque fibre est utilisée tour à tour pour véhiculer le faisceau d'illumination et également le faisceau de retour correspondant provenant de l'objet observé. La résolution spatiale est obtenue par focalisation du faisceau laser en un point et par le caractère confocal résidant dans le filtrage spatial de l'objet observé par les mêmes fibres que celles ayant servi à l'illumination. Cela permet de réceptionner, au moyen d'un photodétecteur 9, exclusivement le signal provenant de l'objet observé et de réaliser une image point par point.

L'extrémité distale du guide d'image est insérée dans un tube piézoélectrique 7, lui-même monté dans un tube rigide 3 formant tête optique et contenant des optiques 8 placées en sortie du guide d'image 1. Le tube piézoélectrique 7 permet de déplacer le guide d'image 1 à l'intérieur de la tête optique 3 qui reste fixe par rapport à l'objet observé. On évite ainsi les problèmes dus au frottement de la tête optique sur l'objet observé.

Sur la figure 2 on voit en perspective la configuration du tube piézoélectrique 7. Ce tube 7 est constitué de quatre céramiques occupant chacune un quart de

- 9 -

cylindre. Le tube 7 est recouvert d'argent sur les faces interne et externe afin d'utiliser l'effet piézoélectrique transversal. Ce phénomène explique la déformation d'un cristal lorsque celui-ci est plongé dans un champ électrique, il résulte de l'existence de dipôles électriques dans la configuration cristalline.

5 Lorsqu'on applique une tension entre la face interne et externe d'une céramique, celle-ci s'allonge (ou se rétrécit selon le signe de la tension) et devient plus fine (respectivement plus large). Le balayage se fait donc en appliquant une tension positive sur une des céramiques et la tension opposée sur la céramique opposée. Comme une face s'allonge et la face opposée se raccourcit, le tube 7 se
10 courbe et son extrémité libre se déplace. Il est ainsi possible de décaler l'extrémité distale des fibres selon deux axes orthogonaux et ce dans les deux sens. La figure 3 illustre un déplacement du tube piézoélectrique 7 selon un axe. Les traits pleins représentent la position de repos, sans décalage. Les traits en pointillés représentent l'extrémité du tube piézoélectrique 7 décalé vers le haut, entraînant
15 ainsi le décalage de l'extrémité distale du guide d'image 1. Par contre les optiques 8a et 8b, solidaires de la tête optique, ainsi que l'objet observé 4 restent fixes. Le déplacement de l'extrémité distale du guide d'image correspond à un déplacement du point d'impact du faisceau laser sur l'objet observé.

 Pour chaque paire de tensions appliquées sur le tube piézoélectrique 7, une
20 déformation est réalisée, et l'acquisition effectuée au travers du guide d'image 1 est ainsi décalée d'une distance proportionnelle aux tensions appliquées.

 Le procédé de super-résolution selon l'invention comporte une première étape dans laquelle pour une position fixe donnée de la tête optique, on réalise une série d'acquisitions. Pour chaque acquisition, le faisceau laser balaye l'ensemble
25 des fibres optiques. Le photodétecteur 9 récupère alors un ensemble de données brutes que l'on peut représenter en les arrangeant sur une grille suivant l'ordre du balayage laser. On voit apparaître pour chaque fibre des dômes représentatifs de la position des fibres dans le guide par rapport au balayage laser. Le décalage de l'extrémité distale du guide d'image 1 ne change pas l'arrangement ou la position
30 des fibres optiques à l'extrémité proximale du guide d'image. Par contre l'objet observé à travers ces dômes assimilables à une grille avec des trous s'est déplacé lorsque le tube piézoélectrique 7 s'est déformé.

- 10 -

Ensuite ces données brutes sont transformées en nuage de points pondéré par la puissance optique mesurée sur l'objet, à travers chaque fibre du guide d'image. Cette transformation permet à ce que chaque point représente l'information effectivement vue par chaque fibre au cours du balayage laser. On
5 peut également appliquer un filtre à chaque nuage de points de façon à éliminer des artefacts (grille) liés à la présence du guide d'image.

En réalisant plusieurs acquisitions avec des positions différentes de l'extrémité distale du guide d'image, c'est comme si on avait créé des points d'échantillonnage décalés par exemple verticalement et horizontalement. Le
10 nombre d'acquisitions et les directions ne sont limités que par la précision du tube piézoélectrique 7.

Sur la figure 4, on voit pour chaque fibre, une zone d'influence que l'on peut définir comme la largeur de la fonction de transfert optique de chaque fibre combinée avec celle des optiques placés entre la sortie du guide d'image et l'objet
15 observé. On remarque que la fonction de transfert d'une fibre n'est pas forcément égale à celle de la fibre voisine. En pratique on peut les considérer comme étant toutes différentes, au moins dans leur largeur.

Avant de pouvoir superposer les nuages de points, il faut les recalcr. En effet, on a acquis le même objet, mais le schéma d'échantillonnage est décalé.
20 Après correction des distorsions géométriques du système, le décalage se réduit à une translation qui est évaluée en comparant toutes les acquisitions d'un même objet à une acquisition de référence, en générale celle où le tube piézoélectrique 7 est au repos (par convention).

Le problème de recalage des images est un sujet assez classique et de
25 nombreuses techniques existent. Le problème consiste à recalcr deux images d'un même objet prises avant et après décalage grâce au mécanisme piézoélectrique. Dans le cas présent, le modèle de transformation sous-jacent est un modèle de translation. Le nombre de paramètres à estimer n'est donc que de deux (x, y). Cependant, le modèle de transformation du cas présent diffère de beaucoup
30 d'études car on utilise une grille irrégulière.

Dans le cas présent, on cherche la meilleure transformation en minimisant une fonction de coût à deux paramètres (les valeurs de la translation suivant les axes de translation). On peut par exemple considérer que les problèmes aux

- 11 -

bords sont négligeables car les déplacements sont petits. La solution recherchée est alors proche de (0,0).

Le principe de l'algorithme retenu est illustré sur la figure 5. D'une façon générale, on va définir un nuage de points de référence, ci-après désigné par nuage de points fixe. On va ensuite interpoler ce nuage de points fixe de façon à reconstruire une image ci-après désignée par image fixe 10.

En particulier, l'interpolation du nuage de points fixe pour obtenir l'image fixe est réalisée en utilisant l'algorithme d'approximation b-spline itérative divulgué dans le document de Seungyong Lee et al., et que l'on décrit brièvement un peu plus loin. Afin de ne pas calculer à chaque fois la valeur de l'interpolation, on réalise une interpolation sur une grille régulière fine, de préférence carrée, puis on choisit le plus proche voisin. On obtient ainsi une interpolation assez lisse et très rapide à calculer.

On réalise ensuite une interpolation de chaque autre nuage de points, ci-après désigné par nuage de points mobile, de façon à reconstruire une image mobile. Puis on optimise l'erreur quadratique moyenne entre chaque image mobile et l'image fixe. Advantageusement, on ne réalise pas, comme c'est classiquement le cas, un calcul pixel par pixel entre deux images, mais on réalise un calcul en ne prenant en compte que les pixels correspondant aux points du nuage de points mobile. L'avantage en est un gain de temps considérable.

L'optimisation est réalisée avec une boucle dont les étapes sont :

Une étape de transformation 14 dans laquelle on définit des paramètres de translation qui vont être évalués dans la boucle ;

Une étape d'interpolation 12 de la transformation, dans laquelle on translate le nuage de points mobile initial par la transformation en cours ;

Une étape de calcul de distance 13, dans laquelle on mesure une distance entre l'image mobile issue du nuage de points mobile 11 translaté et l'image fixe 10 représentant le nuage de points fixe. Cette distance est une erreur quadratique moyenne évaluée entre les points du nuage de points mobile et l'image fixe interpolée ;

Une étape d'optimisation dans laquelle on utilise un optimiseur 15 à base de gradient, comme un gradient conjugué. L'optimiseur 15 évalue les variations locales de la distance précédemment calculée afin de trouver une nouvelle

- 12 -

transformation (i.e. translation) qui permette de diminuer la valeur de la distance (c'est-à-dire l'optimiser) à la prochaine boucle.

On sort de la boucle lorsque la fonction distance ne décroît plus.

Afin d'éviter de réaliser le processus de recalage qui vient d'être décrit pour
5 tous les nuages de points, on va effectuer ce processus de recalage pour un objet
de référence avec un nombre limité d'acquisitions. Pour ce faire, on remplace
l'objet observé par l'objet de référence tel une mire d'étalonnage ou plus
précisément une mire de résolution par exemple. Les résultats obtenus lors de ce
recalage d'un nombre limité de nuages de points permettent ensuite d'étalonner les
10 décalages du tube piézoélectrique en fonction des tensions appliquées.
L'ensemble guide d'image 1 et tête optique 3 peut tourner par rapport à l'axe du
balayage de la partie confocale 5, 6, il faut donc au moins estimer l'axe des
déplacements ainsi que leur sens. Pour cela, on réalise un nombre limité de
décalages possibles, par exemple 64, et on les recalcule par rapport à une référence
15 commune, par exemple un nuage de points obtenu lorsque le tube piézoélectrique
est au repos. Puis on effectue une régression linéaire sur l'ensemble des couples
tension appliquée au piézoélectrique - décalage mesuré par recalage. Si ce modèle
est linéaire et a une précision satisfaisante (très inférieure à la distance inter-cœur),
on considère que le modèle est valable, et on peut l'utiliser directement par la suite
20 sur les acquisitions ultérieures réalisées sur l'objet de mesure, sans avoir à recalculer
de nouveaux les images représentées par les nuages de points. Ce mode de
réalisation préférentiel permet donc un traitement beaucoup plus rapide puisque
les nuages de points acquises avec l'objet observé ne subissent pas tout le
processus de recalage avec interpolation. Ce processus n'est réalisé que pour 64
25 nuages points acquis avec une mire de résolution ou autre.

On peut aussi envisager, dans un mode non préférentiel, d'utiliser
directement l'objet observé plutôt qu'une mire de résolution pour élaborer le
modèle linéaire à partir d'un nombre limité de nuages de points.

Dans le cas où le modèle n'est pas linéaire, ou s'il est imprécis, ou s'il y a de
30 l'hystérésis, on ne peut pas l'utiliser. Il convient donc dans ce cas de mettre en
œuvre le mode dégradé décrit précédemment, c'est à dire interpoler puis recalculer
chaque nuage de points qui doit faire l'objet de super-résolution.

- 13 -

Lorsque tous les décalages sont connus, on fait subir à chaque échantillonnage le décalage correspondant, et on les superpose. On obtient ainsi une acquisition synthétique avec autant de points en plus que d'acquisitions. La reconstruction s'effectue alors en deux temps. Tout d'abord, on approxime, ou on
 5 interpole, le nuage de points pondéré résultant avec des méthodes classiques. On prend bien en compte le fait que ce nuage résultant est irrégulier. On utilise par exemple l'approximation itérative de bsplines telle que définie précédemment lors du recalage. Cet algorithme peut être brièvement décrit ci-après :

Soit f la fonction à reconstruire. On va exprimer f sous forme d'une fonction
 10 B-spline bicubique uniforme définie sur un maillage rectangulaire Φ couvrant le support de f . La fonction obtenue est donc C^2 . On note $\Phi_{i,j}$ les valeurs associées aux noeuds du maillage. Sans perte de généralité, on suppose que ce maillage est composé des points de coordonnées entières sur un rectangle du plan.

Connaissant les valeurs des points de contrôle $\Phi_{i,j}$, f est donnée par :

$$15 \quad f(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 [\Phi_{|x|-1+k, |y|-1+l} B_k(x - |x|) B_l(y - |y|)] \quad (1)$$

La B-spline est donnée par:

$$\begin{aligned} B_0(t) &= \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ B_1(t) &= \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ 20 \quad B_2(t) &= \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ B_3(t) &= \frac{1}{6}t^3 \end{aligned}$$

L'estimation des points de contrôles $\Phi_{i,j}$ s'effectue par approximations itératives, en utilisant des treillis hiérarchiques. On passe d'une échelle à l'échelle suivante en raffinant le treillis d'un facteur 2. Chaque point de l'échantillonnage va
 25 influencer 16 points de contrôle. Sans inverser l'ensemble du système, on va à chaque échelle calculer les contributions des échelles précédentes localement, et déduire les résidus à estimer pour cette échelle. Chaque point de l'échantillonnage va influencer les 16 points de contrôle les plus proches.

- 14 -

Cet algorithme permet d'obtenir une interpolation à la convergence de l'algorithme (nombre fini d'itérations). Dans le cas présent, on peut considérer deux cas limites pour la taille du treillis. Le premier est le cas où il n'existe pas un seul point de contrôle $\Phi_{i,j}$ qui ne soit influencé par au moins un point de l'échantillonnage. Le second est le cas où deux points quelconques de l'échantillonnage ne peuvent influencer un même point de contrôle. Ces deux cas permettent de calculer la taille du treillis de départ, et la taille du treillis permettant d'atteindre la convergence. Ces tailles peuvent être calculées empiriquement en supposant que la répartition des points est celle d'un échantillonnage hexagonal.

On observe l'histogramme des distances entre les points d'échantillonnage voisins (au sens de leur diagramme de Voronoï), et on garde le quantile à 5% (ou tout autre faible pourcentage). Cette distance minimale est en fait la distance entre deux décalages.

D'autres algorithmes permettent de reconstruire un nuage de points avec des résultats satisfaisants. L'originalité réside dans la formalisation du problème sous forme d'interpolation ou d'approximation d'un nuage de points irréguliers.

Selon l'invention, on réalise éventuellement ensuite une étape de déconvolution du signal en faisant l'approximation que le système est linéaire invariant, et en prenant une fonction de transfert moyen d'une fibre du guide d'image. Un filtrage de Wiener par exemple peut être utilisé.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, où pour une position donnée de la tête optique, le procédé comprend :
- réalisation d'une pluralité d'acquisitions à travers le guide d'image, chaque acquisition étant réalisée pour un décalage spatial donné de l'extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique ;
 - transformation des données de chaque acquisition en un nuage de points pondéré par la puissance optique mesurée sur l'objet d'observation à travers chaque fibre optique du guide d'image ;
 - recalage de chaque nuage de points par rapport à un nuage de points pris comme référence ;
 - superposition des nuages de points ainsi recalés ; et
 - reconstruction d'une image finale à partir de cette superposition.
2. Procédé selon la revendication 1, où l'étape de la transformation des données acquises est suivie de l'application d'un filtre pour éliminer des artefacts dus à la présence du guide d'image.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, où l'étape de recalage comprend : correction des distorsions géométriques, reconstruction d'une image de référence désignée par image fixe, par interpolation d'un nuage de points de référence dit nuage de points fixe, et pour chaque autre nuage de points, désigné par nuage de points mobile, reconstruction d'une image dite mobile, puis optimisation d'une erreur quadratique moyenne calculée entre l'image mobile et l'image fixe.

4. Procédé selon la revendication 3, où l'on calcule l'erreur quadratique moyenne en ne considérant que les pixels correspondant aux points desdits nuages de points mobiles.

5

5. Procédé selon la revendication 3 ou 4, où l'interpolation consiste en un algorithme dit d'approximation B-splines itérative.

10

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 5, où le nuage de points fixe correspond à une position du guide d'image au repos.

15

7. Procédé selon la revendication 1 ou 2, où l'étape de recalage consiste à recalculer les nuages de points en fonction de distances de décalage prédéterminées obtenues par une étape d'étalonnage des déplacements du guide d'image.

20

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, où à chaque acquisition, pour décaler le guide d'image par rapport à la tête optique, on applique au moins une tension sur au moins une bande piézoélectrique, qui est au moins solidaire de l'extrémité distale du guide d'image.

25

30

9. Procédé selon la revendication 8, où on réalise une étape d'étalonnage en appliquant les étapes suivantes sur un nombre limité de nuages de points obtenus par acquisition d'une mire de référence disposée à la place de l'objet d'observation: correction des distorsions géométriques ; reconstruction d'une image de référence désignée par image fixe par interpolation d'un nuage de points de référence dit nuage de points fixe ; pour chaque autre nuage de points, désigné par nuage de points mobile, reconstruction d'une image dite mobile, puis optimisation d'une erreur quadratique moyenne calculée entre l'image mobile et l'image fixe ; et élaboration d'un modèle linéaire décrivant la distance de décalage obtenue entre image fixe et image mobile en fonction de la tension appliquée sur la bande piézoélectrique pour réaliser le décalage.

10. Procédé selon la revendication 8 ou 9, où on utilise quatre bandes constituant un tube piézoélectrique qui entoure au moins l'extrémité distale du guide d'image, et où, pour chaque déplacement de l'extrémité distale du guide d'image, une paire de tensions opposées sur respectivement deux bandes opposées.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, où le décalage spatial est obtenu par un mouvement sensiblement de translation latérale de l'extrémité distale du guide d'image selon deux directions orthogonales.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, où on réalise l'étape de reconstruction de l'image finale au moyen d'un algorithme dit d'approximation B-splines itérative pour lequel la superposition est considérée comme un nuage de points irréguliers.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, où l'étape de reconstruction de l'image finale est suivie d'une étape de déconvolution de l'image finale.

14. Dispositif pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques et un tube piézoélectrique entourant le guide d'image et solidaire du guide d'image, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, la tête optique comprenant des moyens optiques solidaires de cette tête optique, le tube piézoélectrique étant à l'extrémité distale du guide d'image de façon à spatialement décaler l'extrémité distale par rapport à la tête optique en réponse à une consigne de décalage.

15. Dispositif selon la revendication 14, où le tube piézoélectrique comprend au moins quatre bandes céramiques indépendantes occupant chacune un quart du tube.

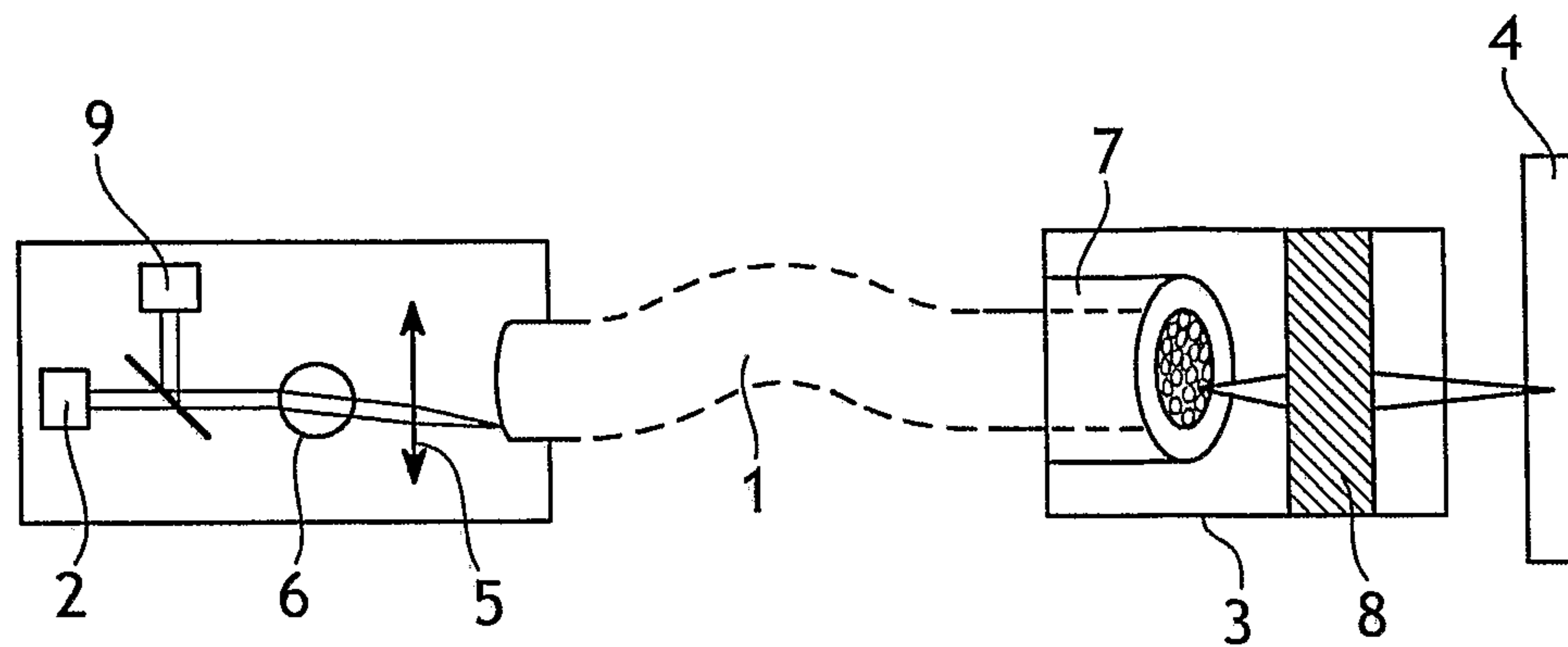
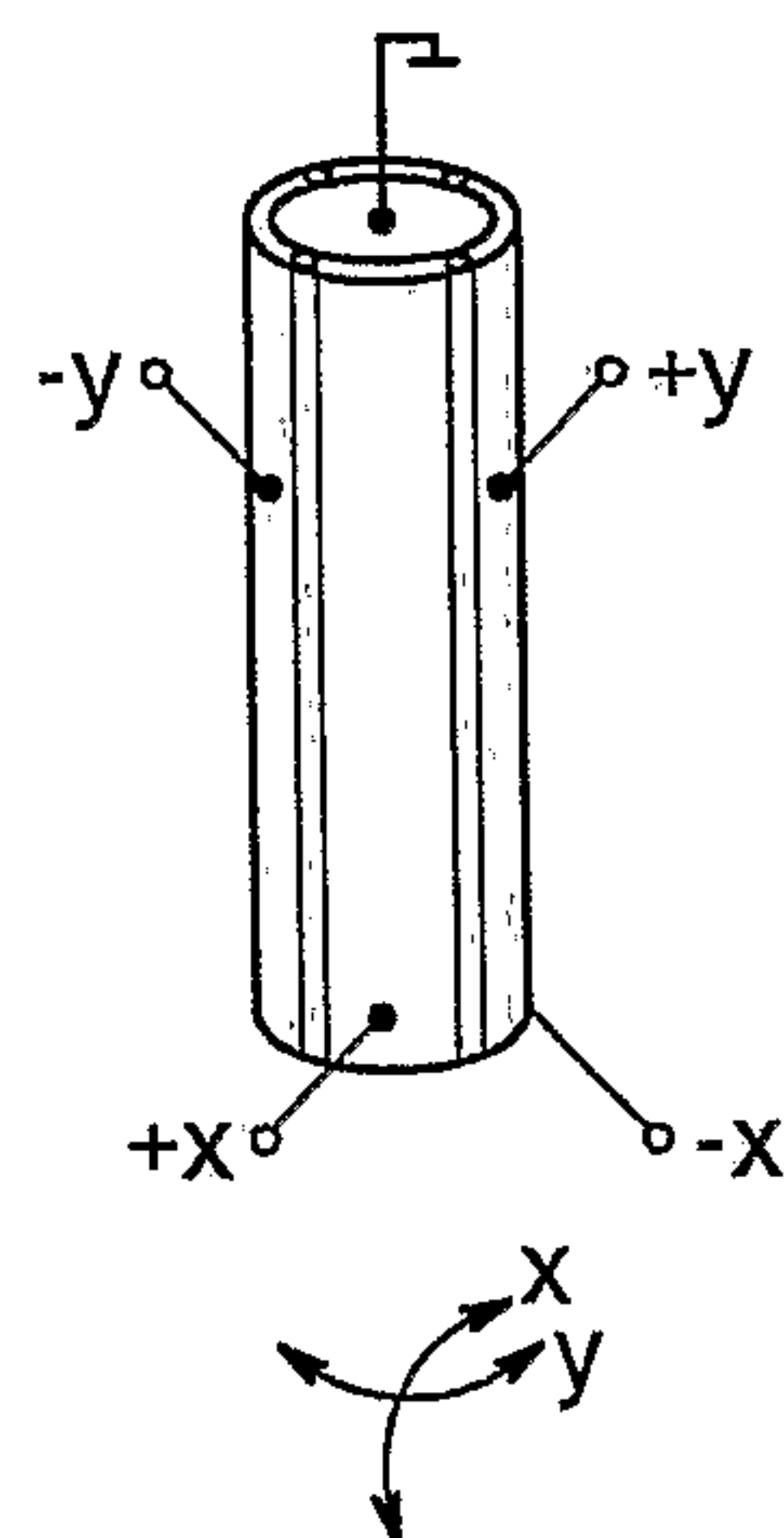
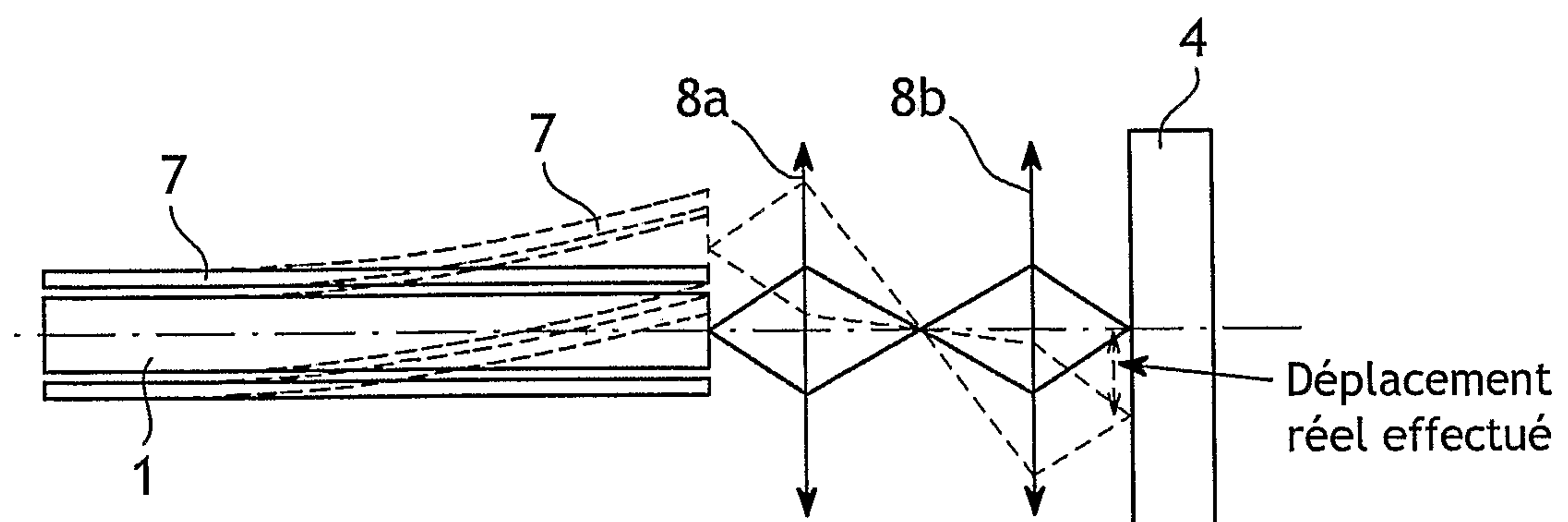
16. Dispositif selon la revendication 15, où les faces interne et externe de chaque bande sont recouvertes de matériau métallique, tel que l'argent, de sorte que l'application de tensions opposées sur deux bandes opposées respectivement, décale l'extrémité distale du tube en utilisant l'effet piézoélectrique transversal.

17. Dispositif selon la revendication 15 ou 16, où les bandes céramiques sont commandées deux par deux dans deux directions orthogonales.

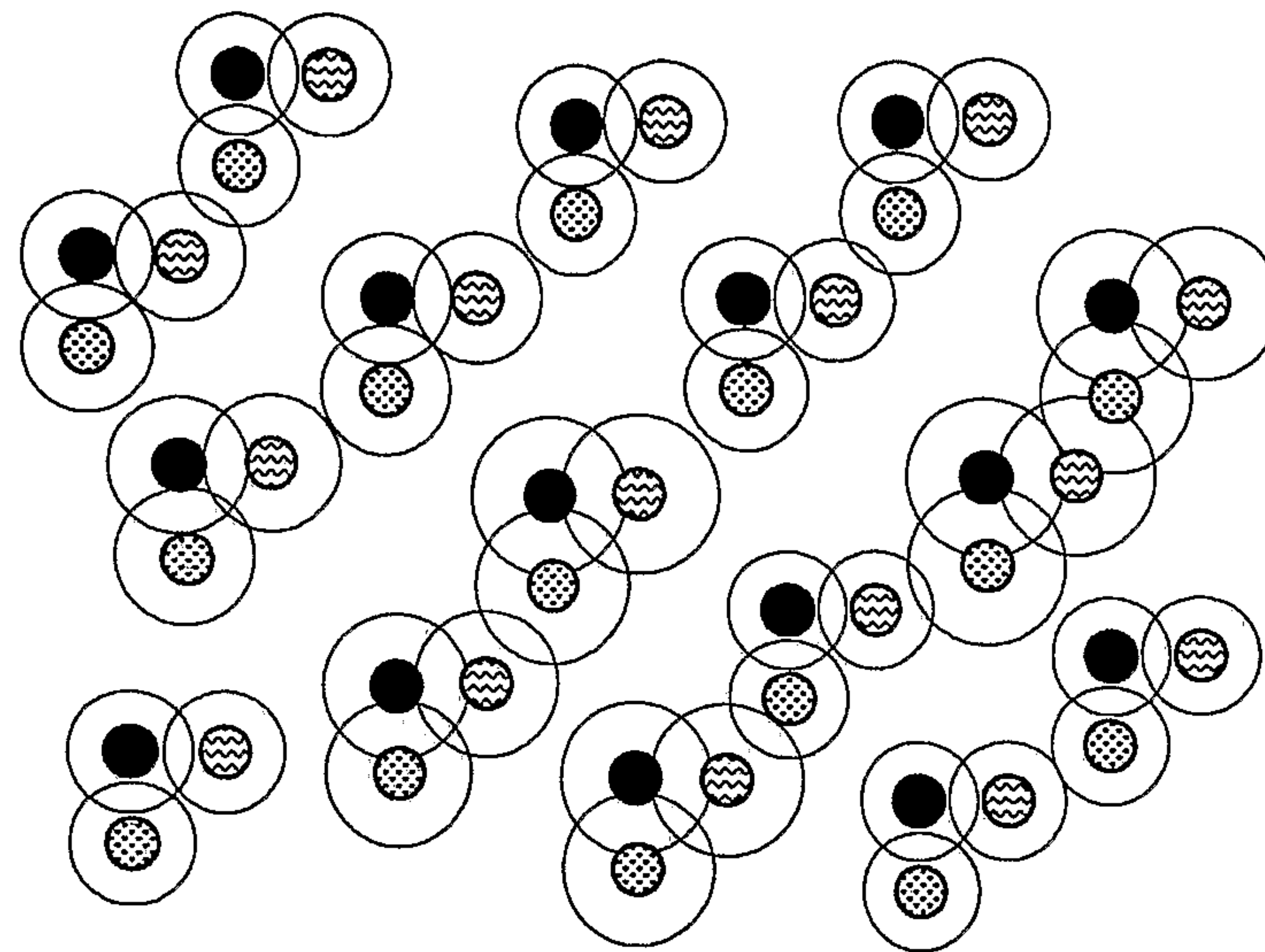
18. Système mettant en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, pour augmenter la résolution d'images confocales acquises à travers un guide d'image comprenant une pluralité de fibres optiques et un tube piézoélectrique entourant le guide d'image et solidaire du guide d'image, le guide d'image ayant une extrémité proximale connectée à un dispositif de balayage laser prévu pour émettre un faisceau laser dans chaque fibre optique du guide d'image et recueillir chaque faisceau de retour lors d'une acquisition et une extrémité distale associée à une tête optique pour focaliser le faisceau laser émis par le guide d'image dans un objet d'observation, où pour une position donnée de la tête optique, le système comprend :

- des moyens pour réaliser une pluralité d'acquisitions à travers le guide d'image ;
- des moyens pour spatialement décaler, à chaque acquisition, l'extrémité distale du guide d'image par rapport à la tête optique ;
- des moyens pour transformer des données de chaque acquisition en un nuage de points pondéré par la puissance optique mesurée sur l'objet à travers chaque fibre optique du guide d'image ;
- des moyens pour recalculer chaque nuage de points ;
- des moyens pour superposer les nuages de points ainsi recalculés, et
- des moyens pour reconstruire une image finale à partir de cette superposition.

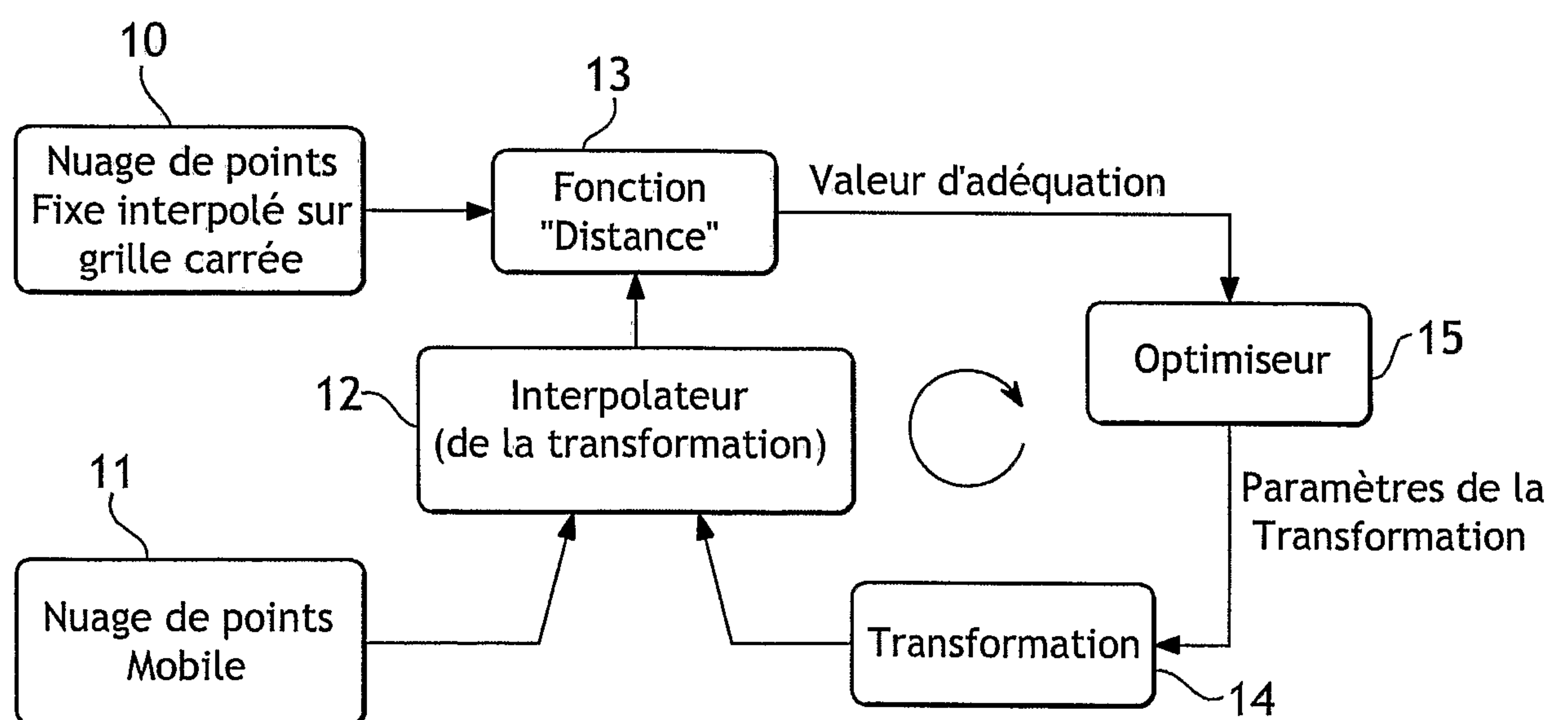
1 / 2

FIG.1FIG.2FIG.3

2/2



- 1ère Acquisition ● : Centre d'une Fibre
- ⊙ 2ème Acquisition ○ : Zone d'influence d'une Fibre
- ⊙ 3ème Acquisition

FIG.4FIG.5

