

(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
5 décembre 2013 (05.12.2013)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2013/178540 A1

- (51) Classification internationale des brevets :
G06T 7/00 (2006.01) *G01B 11/245* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2013/060701
- (22) Date de dépôt international :
24 mai 2013 (24.05.2013)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1255093 1 juin 2012 (01.06.2012) FR
- (71) Déposants : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR). ECOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN [FR/FR]; 61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan Cedex (FR).
- (72) Inventeurs : HILD, François; 49 avenue Sully Prudhomme, F-92290 Chatenay Malabry (FR). ROUX, Sté-

phane; 180 rue du Général Leclerc, F-93110 Rosny-sous-Bois (FR).

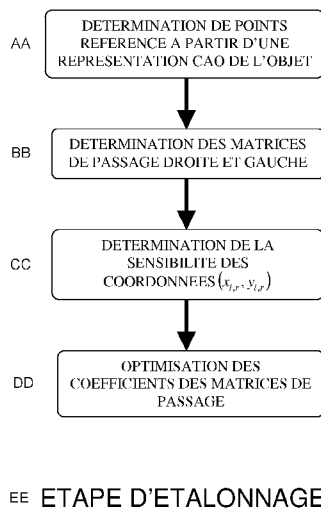
(74) Mandataires : BREDA, Jean-Marc et al.; Marks & Clerk France, Conseils en Propriété Industrielle, Immeuble Visions, 22 avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD OF THREE-DIMENSIONAL MEASUREMENTS BY STEREO-CORRELATION USING A PARAMETRIC REPRESENTATION OF THE MEASURED OBJECT

(54) Titre : PROCÉDE DE MESURES TRIDIMENSIONNELLES PAR STEREO-CORRELATION UTILISANT UNE REPRESENTATION PARAMÉTRIQUE DE L'OBJET MESURE



(57) Abstract : The general field of the invention is that of methods of three-dimensional measurements of an object by stereo-correlation. These methods require at least two cameras connected to image processing means. These methods comprise at least a first step of calibrating the two image planes and a second step of spatial matching between these two image planes. These two steps can be followed by a third step of time matching. The method according to the invention requires objects of which the surface has a parametric representation, i.e. a mathematical representation of the surface of the object having the form of a decomposition on the basis of scalar functions. Said parametric representation is implemented during the first step of calibrating and/or during the second and third steps of spatial or time matching.

(57) Abrégé : Le domaine général de l'invention est celui des procédés de mesures tridimensionnelles d'un objet par stéréocorrélation. Ces procédés nécessitent au moins deux caméras reliées à des moyens de traitement d'images. Ces procédés comportent au moins une première étape d'étalonnage des deux plan-images et une seconde étape d'appariement spatial entre ces deux plan-images. Ces deux étapes peuvent être suivies d'une troisième étape d'appariement temporel. Le procédé selon l'invention nécessite des objets dont la surface possède une représentation paramétrique, c'est-à-dire une représentation mathématique de la surface de l'objet ayant la forme d'une décomposition sur une base de fonctions scalaires. Ladite représentation paramétrique est mise en œuvre lors de la première étape d'étalonnage et/ou lors des seconde et troisième étapes d'appariement spatial ou temporel.

FIG. 4

- AA DETERMINATION OF REFERENCE POINTS FROM A CAD REPRESENTATION OF THE OBJECT
- BB DETERMINATION OF THE RIGHT AND LEFT TRANSFER MATRICES
- CC DETERMINATION OF THE SENSITIVITY OF THE COORDINATES (x_{i,r}, y_{i,r})
- DD OPTIMISATION OF THE COEFFICIENTS OF THE TRANSFER MATRICES
- EE CALIBRATION STEP

WO 2013/178540 A1



(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

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

Procédé de mesures tridimensionnelles par stéréo-corrélation utilisant une représentation paramétrique de l'objet mesuré

Le domaine général de l'invention est celui des procédés de mesures tridimensionnelles d'objets par des moyens optiques, ces procédés présentant l'avantage d'une mesure sans contact avec l'objet. Plus précisément, le domaine de l'invention est celui des procédés utilisant la stéréocorrélation. Ces procédés sont également connus sous l'acronyme « 3D-DIC » signifiant « Three Dimensions Digital Image Correlation ».

De façon générale, les procédés de stéréo-corrélation nécessitent au moins deux caméras de prise de vues permettant de prendre des images de l'objet à mesurer sous deux angles différents et des moyens d'analyse et de traitement des images issues de ces deux caméras. Le principe de la mesure est illustrée en figure 1. La surface d'un objet O est représentée par un ensemble de points M ayant des coordonnées (x,y,z) dans un repère (X, Y, Z) lié à l'objet. Dans le repère (U_1, V_1) du plan-image de la première caméra, l'image du point M est en M_1 de coordonnées (u_1, v_1) et dans le repère (U_2, V_2) du plan-image de la seconde caméra, l'image du point M est en M_2 de coordonnées (u_2, v_2) . Connaissant les deux matrices de passage entre le repère (X, Y, Z) et les repères (U_1, V_1) et (U_2, V_2) , il est alors possible de trouver les coordonnées de chaque point M de l'objet, connaissant les coordonnées de ses deux projections M_1 et M_2 dans les plans images des deux caméras.

A ces changements de repères qui sont des paramètres extrinsèques s'ajoutent des quantités intrinsèques telles que les focales des optiques des caméras, les paramètres d'échelle ou encore les coordonnées des points focaux qui caractérisent chaque moyen de prise d'image utilisé. Ces deux ensembles de paramètres doivent être connus afin de pouvoir reconstruire les formes tridimensionnelles surfaciques de l'objet. On peut noter que les deux ensembles de paramètres peuvent être regroupés pour définir la matrice de passage associée à chaque caméra ; cette dernière étant déterminée sans nécessairement devoir distinguer les paramètres intrinsèques et extrinsèques.

Les procédés de stéréocorrélation comportent deux étapes principales qui sont d'une part une étape d'étalonnage ou de calibration et d'autre part, une étape dite d'appariement spatial permettant la détermination des caractéristiques géométriques de l'objet mesuré. Ces deux premières
5 étapes peuvent être suivies d'une troisième étape de suivi des caractéristiques géométriques dans le temps. Cette dernière étape est utile lorsque l'objet subit un traitement susceptible d'entraîner des déformations, par exemple, lorsque l'on soumet l'objet à un essai de résistance mécanique ou lors d'un procédé de fabrication ou d'assemblage.

10 Comme on l'a vu au paragraphe précédent, il est indispensable de parfaitement connaître le lien existant entre le repère de l'objet et les repères des plans images des deux caméras. Pour réaliser cette étape d'étalonnage, on utilise un calibre, une mire d'étalonnage tridimensionnelle dont la géométrie est parfaitement connue. A titre d'exemple, la figure 2 représente
15 l'étalonnage du plan-image de la caméra 1. La mire d'étalonnage M_E est constituée d'une ou de deux surfaces planes faisant entre elles un angle connu. Chaque surface est couverte de formes géométriques remarquables noires et blanches qui peuvent être, par exemple des rectangles ou des disques. Ainsi, la mire de la figure 2 est couverte d'un damier noir et blanc.

20 Sur l'exemple de la figure 2, trois points du damier P1, P2 et P3 de position connue donnent trois images projetées I1, I2 et I3 de position connue dans le plan-image de la caméra 1. On démontre qu'au moins huit points d'étalonnage sont nécessaires pour obtenir un étalonnage du système de mesure, c'est-à-dire la détermination des éléments des matrices de
25 passage. Les optiques des caméras n'étant pas parfaitement semblables et comportant des aberrations optiques, la phase d'étalonnage peut introduire également des corrections d'aberration pour chaque caméra et nécessite alors un plus grand nombre de points de mesure. Cette phase est nécessairement lourde si l'on souhaite obtenir une grande précision de
30 mesure dans un volume de mesure donné.

La fonction de l'étape d'appariement spatial consiste à retrouver dans les deux plan-image les deux points de projection M1 et M2 correspondant à un même point objet M. Ces points étant déterminés, on peut alors retrouver les coordonnées tridimensionnelles du point M.
35 Différentes méthodes sont mises en œuvre pour réaliser cet appariement.

Elles sont basées sur un code de Corrélacion d'Images Numériques, aussi connu sous les acronymes français « CIN » ou anglais « DIC ».

Il existe différents types de codes CIN. Un premier type consiste à réaliser des corrélacions locales entre les deux images d'un même objet de façon à détecter pour un point M1 appartenant au premier plan-image le point M2 de correspondance dans la seconde image. Pour réaliser cette 5 corrélacion, les images sont découpées en « imagettes » de petites dimensions. Ainsi, une imagette peut être un carré comportant, par exemple, 16x16 pixels. A une première imagette déterminée appartenant au premier 10 plan-image, on cherche la seconde imagette correspondante dans le second plan-image. Compte-tenu que les imagettes sont de petite dimension, il est possible de considérer que la seconde imagette est obtenue par une transformation simple de la première imagette, c'est-à-dire une translation, et souvent un gradient de déplacement constant sur l'imagette, voire 15 éventuellement des transformations plus complexes. On simplifie ainsi de façon importante les calculs de corrélacion compte-tenu du caractère local de l'analyse. Cependant, cette méthode, par nature, ne prend pas en compte les transformations plus complexes que celles utilisées dans l'analyse mais susceptibles d'exister entre les deux imagettes. De plus, la régularité du 20 champ de déplacement, qui se traduit, par exemple, par la continuité, la différentiabilité existant entre imagettes contigües, n'est pas prise en compte.

On comprend bien que, pour obtenir une grande résolution spatiale, on réduit les dimensions des imagettes, mais ce faisant, la corrélacion devient plus sensible au bruit, et la détermination des matrices de 25 passage devient plus incertaine.

Un second type de code CIN consiste à réaliser une corrélacion globale entre les deux images. Dans ce cas, on cherche à déterminer l'ensemble du champ de déplacement existant entre les deux images de façon à obtenir la différence la plus faible possible entre les deux images. 30 Pour réaliser cette étape, on considère que les deux images sont décrites par des variations de niveaux de gris, qui sont fonction des coordonnées spatiales prises dans les deux plans image. On note $f(x)$ et $g(x)$ ces deux images, x représentant les coordonnées des points appartenant aux deux images. On considère alors que la seconde image est égale à la première

image à un champ de déplacement près noté $u(x)$. On a alors la relation générale :

$$f(x) = g[x + u(x)] \quad \text{Relation 1}$$

5 Le champ de déplacement $u(x)$ est déterminé en minimisant dans tout le volume de l'objet la différence quadratique existant entre les deux membres de la relation 1, le champ de déplacement étant décomposé sur une base de fonctions adaptées.

Pour avoir plus d'informations sur cette méthode, on se reportera, en particulier, à un premier article intitulé « « Finite-element » displacement fields analysis from digital images : Application to Portevin-Le Châtelier bands », publié dans « Experimental Mechanics 46(2006) 789-804 » dont les auteurs sont Gilles Bernard, François Hild et Stéphane Roux et également à un second article intitulé « Characterization of necking phenomena in high speed experiments by using a single camera », publié dans « EURASIP Journal on Image and Video Processing 2010 (2010) 215956 » dont les auteurs sont Gilles Bernard, Jean-Michel Lagrange, François Hild, Stéphane Roux et Christophe Voltz. Dans ces deux articles, le premier sur la CIN, le second sur son exploitation dans le cadre de la stéréo-corrélation, la base de champs cinématiques choisie pour la décomposition du champ de déplacement sont les fonctions de forme Q4P1 d'un maillage carré régulier.

Cette méthode de corrélation globale nécessite des moyens de calcul plus importants que la précédente mais offre des précisions supérieures.

25 Cependant, ces méthodes, même si elles donnent des performances globalement satisfaisantes pour les utilisateurs, présentent certains inconvénients. On citera notamment une certaine complexité de la phase d'étalonnage, des résultats de mesure sous forme de nuages de points qu'il faut ensuite remettre en forme, la nécessité de recourir à un filtrage ou à une projection sans pouvoir juger et quantifier la perte de fidélité entraînée, une certaine sensibilité au bruit de mesure et enfin, une difficulté à appréhender la qualité de la mesure obtenue en l'absence de toute référence.

Ces difficultés viennent en partie du fait que les mesures sont faites a priori, sans aucune connaissance préalable de la forme et de la

géométrie de l'objet. Or, aujourd'hui, la très grande majorité des objets industriels sont conçus et réalisés à partir de logiciels de conception assistée par ordinateur connus sous l'acronyme français de « CAO », logiciels aussi appelés « Computer Aided Design » connus sous l'acronyme anglais de « CAD ». On possède donc naturellement une représentation paramétrique de l'objet à mesurer. Le cœur du procédé de stéréo-corrélation selon l'invention est d'utiliser cette représentation paramétrique soit pendant l'étape d'étalonnage, soit pendant l'étape de mesure, soit pendant les deux, l'objet à mesurer étant son propre calibre. Par nature, le procédé selon l'invention s'apparente aux codes CIN de corrélation globale.

Plus précisément, l'invention a pour objet un procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet par stéréo-corrélation, ledit procédé étant mis en œuvre par au moins deux caméras reliées à des moyens de traitement d'images, lesdites caméras étant positionnées de façon à donner une première image et une seconde image de l'objet vu sous au moins deux angles différents, les moyens de traitement d'images agencés de façon à déterminer tout ou partie des coordonnées tridimensionnelles dudit objet, ledit procédé comportant au moins deux étapes :

– Une première étape d'étalonnage dans laquelle un calibre de forme connue étant disposé dans le champ des caméras, les moyens de traitement calculent les deux matrices de passage liant les coordonnées tridimensionnelles prises dans le repère du calibre aux coordonnées bidimensionnelles prises dans les deux repères de la première image et de la seconde image et éventuellement les corrections d'aberration ;

– Une seconde étape d'appariement spatial dans laquelle l'objet à mesurer étant disposé dans le champ des caméras, les moyens de traitement déterminent directement la forme tridimensionnelle de l'objet dans sa représentation CAO en exploitant l'appariement des deux images ;

caractérisé en ce que, la surface de l'objet possédant une représentation paramétrique, c'est-à-dire une représentation mathématique de la surface de l'objet ayant la forme d'une décomposition sur une base de fonctions scalaires, ladite représentation paramétrique est mise en œuvre

lors de la première étape d'étalonnage et lors de la seconde étape d'appariement spatial.

Avantageusement, le procédé comporte une troisième étape d'appariement temporel pendant laquelle une pluralité de couples de premières et de secondes images sont enregistrées simultanément à des instants différents et traitées par les moyens de traitement des images, la représentation paramétrique étant également mise en œuvre lors de la troisième étape d'appariement temporel.

Avantageusement, lors de la première étape d'étalonnage, l'objet est son propre calibre.

Avantageusement, le calibre comporte un motif composé de taches blanches et noires de forme et de répartition déterministe ou aléatoire.

Avantageusement, la première image étant décrite par une première fonction dépendant des coordonnées spatiales prises dans le premier plan image et la seconde image étant décrite par une seconde fonction dépendant des coordonnées spatiales prises dans le second plan image, la première et la seconde fonction étant représentatives de la variation des niveaux de gris en chaque point du premier et du second plan-image, l'optimisation des coefficients des deux matrices de passage est effectuée au moyen d'un algorithme dont la fonction est de minimiser le résidu de corrélation existant entre la première fonction et la seconde fonction, le champ de déplacement apparent sur chaque image étant calculé sur la base de fonctions scalaires de la représentation paramétrique de la surface de l'objet et du modèle projectif dudit objet.

Avantageusement, la représentation paramétrique est composée de splines ou de B-splines ou de NURBS ou est une représentation de Bézier, et la base de fonctions scalaires est constituée de polynômes de Bernstein.

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 :

La figure 1 déjà commentée représente le principe général de la mesure tridimensionnelle par stéréocorrélation ;

La figure 2 déjà commentée représente le principe général de l'étape d'étalonnage dans un procédé de mesure par stéréocorrélation ;

La figure 3 représente un exemple de calibre utilisé dans un procédé de mesure par stéréocorrélation selon l'invention ;

5 La figure 4 représente les différentes sous-étapes d'un étalonnage dans un procédé de mesure par stéréocorrélation selon l'invention.

Comme il a été dit, le procédé de stéréocorrélation selon l'invention met en œuvre une représentation paramétrique de l'objet pendant l'étape d'étalonnage et pendant l'étape de mesure, l'objet à mesurer pouvant être son propre calibre. La représentation paramétrique est principalement issue des logiciels de conception assistée par ordinateur.

Les avantages de cette méthode sont les suivants. L'étalonnage peut être réalisé à partir d'une seule paire d'images, ce qui simplifie le mode opératoire. L'objet mesuré est décrit dans le même langage que celui qui a permis sa définition. On peut ainsi plus facilement quantifier l'écart ou l'erreur existant entre l'objet réel et sa définition numérique.

A titre d'exemple non limitatif de mise en œuvre du procédé selon l'invention, une étape d'étalonnage selon l'invention d'un système de mesures tridimensionnelles d'un objet par stéréocorrélation est détaillée ci-dessous.

Le calibre est conçu et réalisé au moyen d'un logiciel de CAD couplé à logiciel de fabrication assistée par ordinateur ou FAO ou CAM pour l'acronyme anglais. Dans cet exemple, sa représentation paramétrique est un carreau de Bézier, la base de fonctions scalaires étant constituée de polynômes de Bernstein. Plus précisément, sa représentation $S(u, v)$ vaut :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n B_{im}(u) B_{jn}(v) P_{ij} \text{ avec } (u, v) \in [0, 1]^2$$

dans laquelle (u, v) sont les coordonnées paramétriques, B_{im} et B_{jn} sont des polynômes de Bernstein de degré m et n vérifiant la relation suivante :

$$30 \quad B_{im}(u) = \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i}$$

De telles représentations sont notamment mises en œuvre dans des versions légèrement plus complexes par le logiciel de marque CATIA commercialisé par la société Dassault Systèmes.

On peut utiliser d'autres représentations paramétriques. On citera, à titre d'exemples, les fonctions splines, les fonctions B-splines ou encore les fonctions B-splines rationnelles non uniformes, plus communément désignées par leur acronyme anglais « NURBS » signifiant « Non-Uniform Rational Basis Splines ».

Le calibre comporte un motif composé de taches blanches et noires. La forme des taches peut être soit un motif déterministe, soit une répartition aléatoire. Dans le cas présent, elles sont déposées aléatoirement par un spray de peinture. La figure 3 représente un exemple d'un tel calibre C avec son revêtement moucheté R.

Deux caméras permettent de prendre des vues de l'objet à mesurer sous deux angles différents. On peut, bien entendu utiliser un nombre plus important de caméras et les apparier deux à deux soit pour obtenir plus de précisions sur une partie de l'objet soit pour obtenir un angle de vue plus important. Les caméras sont généralement de haute définition sans autre spécificité particulière. Elles sont reliées à des moyens de traitement d'images permettant de réaliser les différentes étapes mathématiques du procédé. Le traitement d'images est effectué à partir d'images définies par des niveaux de gris. Autrement dit, on utilise uniquement l'information de luminance des images.

Les différentes fonctions mathématiques utilisées sont connues de l'homme du métier et ne nécessitent pas de ressources logicielles autres que celles déjà utilisées dans le domaine technique de la CIN globale.

Le calibre est disposé dans un espace référencé dans un repère tridimensionnel (X, Y, Z) . Les deux plans-images des caméras sont référencés dans deux repères bidimensionnels notés (x_r, y_r) et (x_l, y_l) .

Les différentes sous-étapes de l'étalonnage sont représentées en figure 4. Dans une première sous-étape, on détermine des points de référence. Le calibre étant en place, on détermine au moins six points sur le calibre dont les coordonnées sont connues et issues de la représentation paramétrique de l'objet. Chaque point a comme coordonnées tridimensionnelles (X_i, Y_i, Z_i) . A chaque point de l'objet, correspond un couple de points dans les deux plans-images droit et gauche notés respectivement (x_r, y_r) et (x_l, y_l) .

Dans une seconde sous-étape, on détermine les matrices de passage M_l et M_r . On a les relations suivantes :

$$\begin{pmatrix} l_l x_l \\ l_l y_l \\ l_l \end{pmatrix} = M_l \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} l_r x_r \\ l_r y_r \\ l_r \end{pmatrix} = M_r \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Relation 2}$$

- 5 l_l et l_r étant les facteurs d'échelle existant entre les plans-image et le repère de l'objet liés en particulier aux grandissements des optiques des caméras, les matrices M_l et M_r étant les deux matrices de passages entre le repère tridimensionnel de l'objet et ceux bidimensionnels des plans-image. Plus précisément, si $m_{ij}^{l,r}$ sont les paramètres des deux matrices M_l et M_r , on obtient la relation suivante :

$$\begin{cases} l_{l,r} x_{l,r} = m_{11}^{l,r} X + m_{12}^{l,r} Y + m_{13}^{l,r} Z + m_{14}^{l,r} \\ l_{l,r} y_{l,r} = m_{21}^{l,r} X + m_{22}^{l,r} Y + m_{23}^{l,r} Z + m_{24}^{l,r} \\ l_{l,r} = m_{31}^{l,r} X + m_{32}^{l,r} Y + m_{33}^{l,r} Z + m_{34}^{l,r} \end{cases} \quad \text{Relation 3}$$

La relation 3 peut encore être mise sous la forme de la relation 4

$$\begin{cases} x_{l,r} = \frac{m_{1i}^{l,r} \bar{X}_i}{l_{l,r}} \\ y_{l,r} = \frac{m_{2i}^{l,r} \bar{X}_i}{l_{l,r}} \end{cases} \quad \text{Relation 4}$$

- 15 dans laquelle les \bar{X}_i sont les coordonnées homogènes des vecteurs $(X, Y, Z, 1)$. 24 paramètres $m_{ij}^{l,r}$ sont donc à déterminer correspondant aux 12 paramètres de la matrice M_l et aux 12 paramètres de la matrice M_r . En pratique, il est nécessaire de déterminer 22 paramètres dans la mesure où tous les paramètres sont déterminés à une constante multiplicative près.

- 20 Dans une troisième sous-étape, on détermine la sensibilité des coordonnées $(x_{l,r}, y_{l,r})$ aux paramètres des matrices de passage. Cette sensibilité a la forme suivante:

$$dx_{l,r} = dx_{l,r}(\tilde{m}_{ij}) + \frac{\partial dx_{l,r}}{\partial m_{ij}} dm_{ij} \quad \text{Relation 5}$$

Dans cette relation, le terme $dx_{l,r}$ correspond aux déplacements apparents des points images dans les deux plans images si l'on modifie un des paramètres $m_{ij}^{l,r}$ des matrices de transformation.

5 Dans une quatrième sous-étape d'optimisation, on affine la détermination des coefficients des matrices de passage.

La première image est décrite par une première fonction $f(x_l)$ dépendant des coordonnées spatiales x_l prises dans le premier plan image et la seconde image étant décrite par une seconde fonction $g(x_r)$ dépendant des coordonnées spatiales prises dans le second plan image, la première et la seconde fonction étant représentatives de la variation des niveaux de gris en chaque point du premier et du second plan-image. La conservation des niveaux de gris d'une image à l'autre implique que, pour un couple de points appartenant aux deux plans-image et représentant le même point de l'objet, que :

$$15 \quad f(x_l + dx_l) = g(x_r + dx_r) \quad \text{Relation 6}$$

Au prix d'un développement de Taylor qui fait partie des méthodes classiques utilisées dans les procédés CIN par approche globale, la relation 6 devient la relation 7 ci-dessous :

$$20 \quad f(x_l) + \nabla f \cdot dx_l = g(x_r) + \nabla g \cdot dx_r \quad \text{Relation 7}$$

Le résidu de corrélation T existant entre la première fonction et la seconde fonction est calculé sur la base de fonctions scalaires de la représentation paramétrique de la surface de l'objet. Il vaut :

$$T = \int (f(x_l) - g(x_r))^2 dudv \quad \text{Relation 8}$$

25 Une procédure itérative est implémentée de façon à minimiser ce résidu. Cette procédure s'apparente à celle mentionnée dans l'article de Gilles Bernard, François Hild et Stéphane Roux publié dans « Experimental Mechanics 46(2006) 789-804 » et déjà cité dans cette description. La modification essentielle étant que la base de fonction choisie est ici issue du modèle projectif et de la forme du calibre et non des fonctions de forme par éléments-finis.

35 Le procédé d'étalonnage ci-dessus s'applique au prix d'adaptations à la portée de l'homme du métier aux phases d'appariement spatial ou aux phases d'appariement temporel de procédés utilisant la stéréocorrélation ou la Corrélation d'Images Numériques CIN-3D. Une régularisation temporelle supplémentaire peut être effectuée en vue d'une

détermination spatiotemporelle des champs de déplacements 3D surfaciques.

Les avantages du procédé selon l'invention sont nombreux. On citera entre autres : moins de variables à déterminer et donc une moindre
5 incertitude sur les résultats, maîtrise de cartes de résidus qui améliore la qualité de la représentation, régularité du champ, absence d'étapes de lissage ou de filtrage des champs de déplacement. D'autre part, un champ dense de résidus permet d'évaluer la qualité de la détermination des différents degrés de liberté cinématiques.

10

REVENDEICATIONS

1. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet (O) par
5 stéréo-corrélation, ledit procédé étant mis en œuvre par au moins deux
caméras reliées à des moyens de traitement d'images, lesdites caméras
étant positionnées de façon à donner au moins une première image et une
seconde image de l'objet vu sous au moins deux angles différents, les
moyens de traitement d'images agencés de façon à déterminer tout ou partie
10 des coordonnées tridimensionnelles dudit objet, ledit procédé comportant au
moins deux étapes :

– Une première étape d'étalonnage dans laquelle un calibre de
forme connue étant disposé dans le champ des caméras, les
moyens de traitement calculent les au moins deux matrices de
15 passage liant les coordonnées tridimensionnelles prises dans le
repère du calibre aux coordonnées bidimensionnelles prises dans
les au moins deux repères de la première image et de la seconde
image dudit calibre ;

– Une seconde étape d'appariement spatial dans laquelle l'objet à
20 mesurer étant disposé dans le champ des caméras, les moyens de
traitement déterminent l'ensemble du champ de déplacement
existant entre les au moins deux images dudit objet à mesurer,
permettant d'obtenir la différence la plus faible possible entre les
dites images;

25 caractérisé en ce que, la surface de l'objet et la surface du calibre
possédant une représentation paramétrique, c'est-à-dire une représentation
mathématique de la surface ayant la forme d'une décomposition sur une
base de fonctions scalaires, ladite représentation paramétrique est mise en
œuvre lors de la première étape d'étalonnage et lors de la seconde étape
30 d'appariement spatial.

2. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon la
revendication 1, caractérisé en ce que, le procédé comporte une troisième
étape d'appariement temporel pendant laquelle une pluralité de couples de

premières et de secondes images sont enregistrées simultanément à des instants différents et traitées par les moyens de traitement des images.

3. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon la
5 revendication 2, caractérisé en ce que la représentation paramétrique est également mise en œuvre lors de la troisième étape d'appariement temporel.

4. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon l'une
10 des revendications précédentes, caractérisé en ce que, lors de la première étape d'étalonnage, l'objet est son propre calibre.

5. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon l'une
15 des revendications précédentes, caractérisé en ce que le calibre comporte un motif composé de taches blanches et noires de forme et de répartition déterministe ou aléatoire.

6. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon l'une
20 des revendications précédentes, caractérisé en ce que, la première image étant décrite par une première fonction dépendant des coordonnées spatiales prises dans le premier plan image et la seconde image étant décrite par une seconde fonction dépendant des coordonnées spatiales prises dans le second plan image, la première et la seconde fonction étant représentatives de la variation des niveaux de gris en chaque point du premier et du second plan-image, l'optimisation des coefficients des deux
25 matrices de passage est effectuée au moyen d'un algorithme dont la fonction est de minimiser le résidu de corrélation existant entre la première fonction et la seconde fonction, le champ de déplacement apparent étant calculé sur la base de fonctions scalaires de la représentation paramétrique de la surface de l'objet et du modèle projectif de l'objet.

30

7. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon l'une
des revendications précédentes, caractérisé en ce que la représentation paramétrique est composée de splines ou de B-splines ou de NURBS ou est une représentation de Bézier.

35

8. Procédé de mesures tridimensionnelles d'un objet selon la revendication 7, caractérisé en ce que la base de fonctions scalaires est constituée de polynômes de Bernstein.

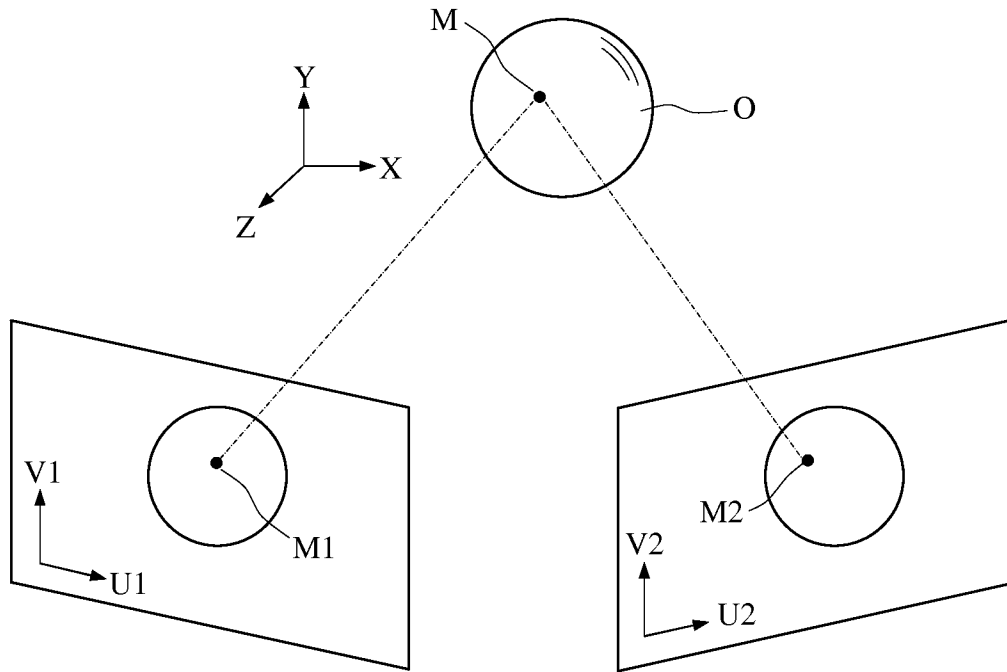


FIG. 1

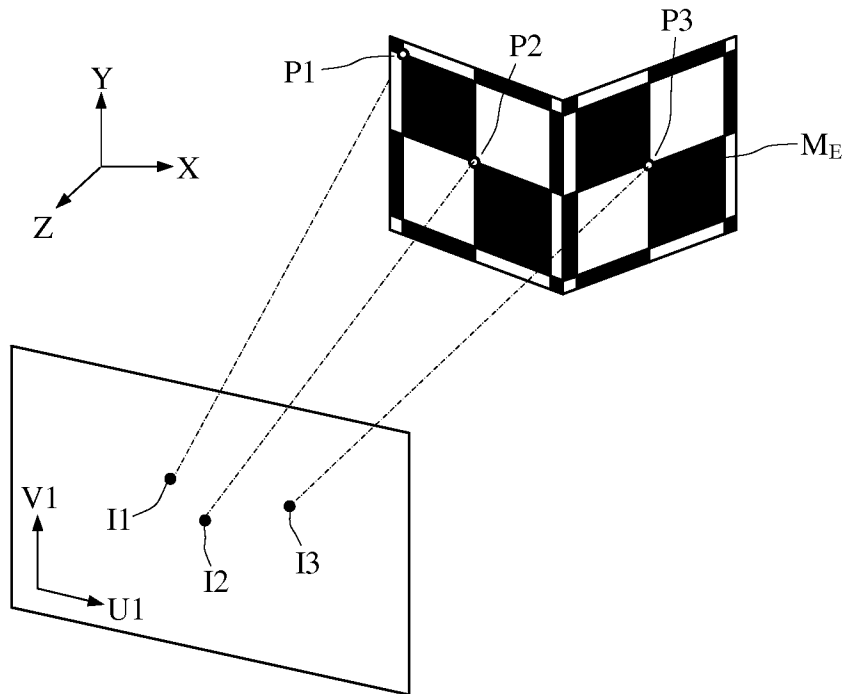


FIG. 2

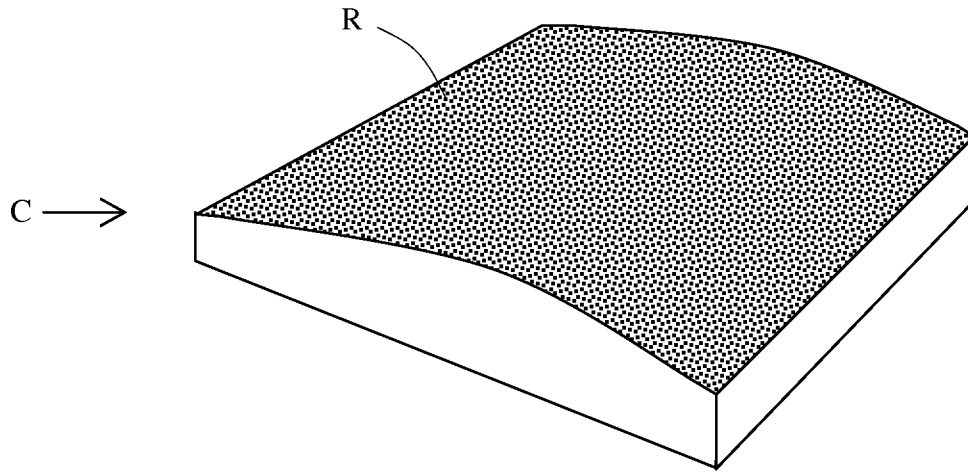
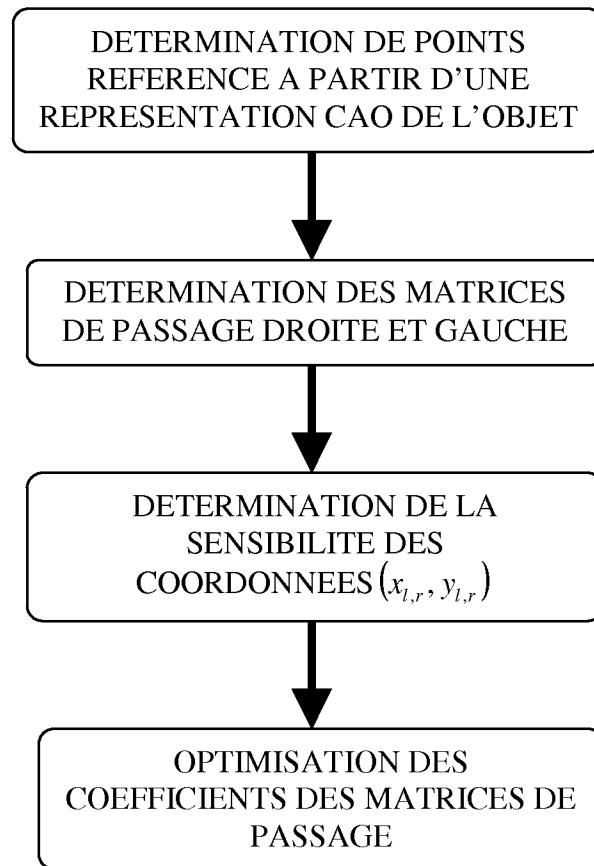


FIG. 3



ETAPE D'ETALONNAGE

FIG. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/060701

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G06T7/00 G01B11/245
ADD.
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G06T G01B
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2008/123937 A1 (ARIAS ESTRADA MIGUEL [MX] ET AL ARIAS-ESTRADA MIGUEL [MX] ET AL) 29 May 2008 (2008-05-29) abstract figure 1 paragraph [0079] - paragraph [0109] paragraph [0110] - paragraph [0135] figure 12 figure 9 paragraph [0103] - paragraph [0105] ----- -/--	1-8

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search 20 August 2013	Date of mailing of the international search report 28/08/2013
---	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Leclercq, Philippe
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/060701

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	TETSUO MIYAKE ET AL: "Online Stereo Measurement System for a Sand Mold", SICE-ICCAS 2006 INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 1 October 2006 (2006-10-01), pages 4047-4050, XP031049974, ISBN: 978-89-950038-4-8 Section 2.1 abstract	1-8
Y	----- WO 2009/157895 A1 (THOMSON LICENSING [FR]; ZHANG DONG-QING [US]; IZZAT IZZAT [US]; YOON Y) 30 December 2009 (2009-12-30) figure 6	1-8
Y	----- CORDES K ET AL: "Extrinsic Calibration of a Stereo Camera System Using a 3D CAD Model Considering the Uncertainties of Estimated Feature Points", VISUAL MEDIA PRODUCTION, 2009. CVMP '09. CONFERENCE FOR, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 12 November 2009 (2009-11-12), pages 135-143, XP031648071, ISBN: 978-1-4244-5257-6 the whole document -----	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2013/060701

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
US 2008123937	A1	29-05-2008	CA 2707176 A1	05-06-2008
			EP 2104365 A1	23-09-2009
			US 2008123937 A1	29-05-2008
			US 2010295926 A1	25-11-2010
			WO 2008066368 A1	05-06-2008

WO 2009157895	A1	30-12-2009	CA 2729106 A1	30-12-2009
			CN 102077246 A	25-05-2011
			EP 2300987 A1	30-03-2011
			JP 5153940 B2	27-02-2013
			JP 2011525657 A	22-09-2011
			US 2011110583 A1	12-05-2011
			WO 2009157895 A1	30-12-2009

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G06T7/00 G01B11/245
ADD.
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
G06T G01B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 2008/123937 A1 (ARIAS ESTRADA MIGUEL [MX] ET AL ARIAS-ESTRADA MIGUEL [MX] ET AL) 29 mai 2008 (2008-05-29) abrégé figure 1 alinéa [0079] - alinéa [0109] alinéa [0110] - alinéa [0135] figure 12 figure 9 alinéa [0103] - alinéa [0105] ----- -/--	1-8

Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- "&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 20 août 2013	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 28/08/2013
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé Leclercq, Philippe

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	TETSUO MIYAKE ET AL: "Online Stereo Measurement System for a Sand Mold", SICE-ICCAS 2006 INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 1 octobre 2006 (2006-10-01), pages 4047-4050, XP031049974, ISBN: 978-89-950038-4-8 Section 2.1 abrégé	1-8
Y	----- WO 2009/157895 A1 (THOMSON LICENSING [FR]; ZHANG DONG-QING [US]; IZZAT IZZAT [US]; YOON Y) 30 décembre 2009 (2009-12-30) figure 6	1-8
Y	----- CORDES K ET AL: "Extrinsic Calibration of a Stereo Camera System Using a 3D CAD Model Considering the Uncertainties of Estimated Feature Points", VISUAL MEDIA PRODUCTION, 2009. CVMP '09. CONFERENCE FOR, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 12 novembre 2009 (2009-11-12), pages 135-143, XP031648071, ISBN: 978-1-4244-5257-6 le document en entier -----	1-8

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2013/060701

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008123937 A1	29-05-2008	CA 2707176 A1	05-06-2008
		EP 2104365 A1	23-09-2009
		US 2008123937 A1	29-05-2008
		US 2010295926 A1	25-11-2010
		WO 2008066368 A1	05-06-2008

WO 2009157895 A1	30-12-2009	CA 2729106 A1	30-12-2009
		CN 102077246 A	25-05-2011
		EP 2300987 A1	30-03-2011
		JP 5153940 B2	27-02-2013
		JP 2011525657 A	22-09-2011
		US 2011110583 A1	12-05-2011
		WO 2009157895 A1	30-12-2009
