

(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
14 février 2019 (14.02.2019)



(10) Numéro de publication internationale
WO 2019/030449 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G06T 7/00 (2017.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2018/052024

(22) Date de dépôt international :
06 août 2018 (06.08.2018)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
17 57646 10 août 2017 (10.08.2017) FR

(71) Déposant : **SAFRAN** [FR/FR] ; 2 Boulevard du Général
Martial Valin, 75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs : **PARRA, Estelle** ; c/o Safran Aircraft Engines,
PI (AJI) - Rond-Point René Ravaud -Réau, 77550 Moissy-Cramayel (FR). **BOUSSAID, Haithem** ; c/o Safran Aircraft Engines, PI (AJI) - Rond-Point René Ravaud -Réau, 77550 Moissy-Cramayel (FR).

(74) Mandataire : **GUERRE, Fabien** ; Brevaux, 95, rue
d'Amsterdam, 75378 Paris Cedex 8 (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,

(54) Title: METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE AUTOMATIC INSPECTION OF MECHANICAL PARTS

(54) Titre : PROCÉDÉ DE CONTRÔLE AUTOMATIQUE NON DESTRUCTIF DE PIÈCES MÉCANIQUES

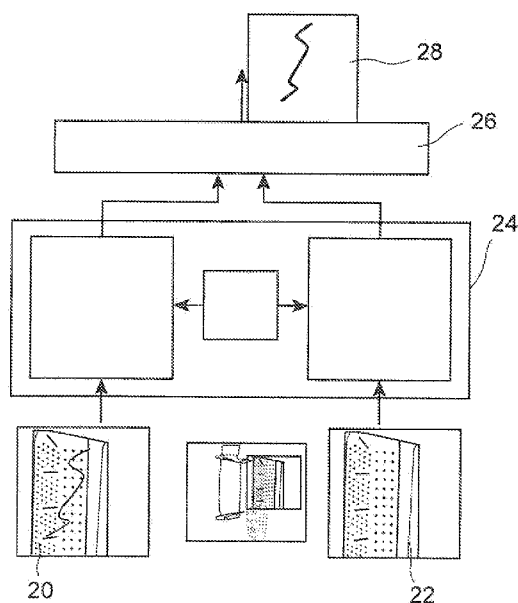


FIG. 8

(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for non-destructive inspection of mechanical parts by inspecting images of said parts obtained by a radiographic image acquisition system. The method according to the invention comprises the following steps: - acquiring at least one real image (20) of a part to be inspected that is likely to contain indications of potential defects, - performing a 2D-3D resetting of a 3D model of the part to be inspected in order to estimate its 3D exposure during the acquisition of the the real image (20), - simulating the operating conditions for acquisition of the real image (20) using the estimated 3D exposure of said part in order to generate a reference image (22) without defects of the part, - generating, by means of an image processing module (24), for each pixel of the real image (20), a first feature vector describing the pixel and its vicinity and, for each pixel of the reference image (22), a second feature vector, - comparing the feature vectors of each pixel of the real image (20) with the feature vectors of the corresponding pixel of the reference image (22), - deducing a map of defects in the part to be inspected using the comparison of the feature vectors of the image pixels.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé et un dispositif de contrôle non destructif de pièces mécaniques par inspection d'images desdites pièces obtenues par un système radiographique d'acquisition d'images. Le procédé selon l'invention comporte les étapes suivantes: -acquérir au moins une image réelle (20) d'une pièce à contrôler susceptible de contenir des indications de défauts potentiels, -effectuer un recalage 2D-3D d'un modèle 3D de la pièce à contrôler pour estimer sa pose 3D lors de l'acquisition de l'image réelle (20), -simuler les conditions opératoires

SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Publiée:

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

d'acquisition de l'image réelle (20) à partir de la pose 3D estimée de ladite pièce pour générer une image de référence (22) sans défauts de ladite pièce, -générer, au moyen d'un module de traitement d'images (24), pour chaque pixel de l'image réel (20) un premier vecteur de caractéristiques décrivant le pixel et son voisinage et pour chaque pixel de l'image de référence (22) un deuxième vecteur de caractéristiques, -comparer les vecteurs de caractéristiques de chaque pixel de l'image réelle (20) au vecteur de caractéristiques du pixel correspondant de l'image de référence (22), -déduire une carte de défauts de la pièce contrôlée à partir de la comparaison desdits vecteurs de caractéristiques de pixels d'image

PROCÉDÉ DE CONTRÔLE AUTOMATIQUE NON DESTRUCTIF DE PIÈCES MÉCANIQUES

DESCRIPTION

5 **DOMAINE TECHNIQUE**

L'invention concerne un procédé et un dispositif de contrôle non destructif de pièces mécaniques par inspection d'images desdites pièce obtenues au moyen d'un système d'acquisition d'images radiographiques par exemple.

10 L'invention concerne également un programme d'ordinateur mémorisé sur un support d'enregistrement et comportant des instructions pour réaliser les étapes du procédé lorsqu'il est exécuté par un ordinateur et un support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé.

15 **ETAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

Pour contrôler l'état d'une pièce issue de la production, le contrôle non destructif consiste à acquérir une image de ladite pièce reproduisant les potentielles indications de défauts et d'inspecter cette image. La modalité d'acquisition de l'image d'observation peut être un système à rayons X, ultrasons, courant de Foucault ou tout
20 autre dispositif de prise de vue susceptible de reproduire les détails de la structure matérielle de la pièce.

Actuellement, les images d'observations à inspecter sont examinées manuellement par des opérateurs pour détecter et localiser les potentiels défauts. Les résultats des observations manuelles sont incertains car ils peuvent varier en fonction de
25 l'observateur. En outre, pour lever le doute sur un potentiel défaut, généralement les opérateurs comparent les images d'observations à inspecter à une image de référence d'une pièce choisie parmi des pièces jugées saines. Une évaluation de l'écart entre une imagerie (patch) d'un potentiel défaut et l'imagerie correspondante dans l'image de référence est alors faite visuellement. L'opérateur décide ensuite de la présence ou non

d'un défaut sur la pièce contrôlée en fonction de l'écart constaté visuellement entre l'imagette de cette dernière et celle de l'image de référence.

Néanmoins, une superposition d'une image de la pièce comportant des indications de défauts et de l'image de référence peut révéler un écart géométrique entre les deux images qui n'est pas dû à un défaut mais plutôt à la variabilité de la position spatiale de chaque pièce lors de l'acquisition d'image. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser un recalage géométrique des images, de la pièce à contrôler et de référence.

Un but de l'invention est de réduire le risque d'erreurs d'observation inhérent à une observation humaine.

Un autre but de l'invention est d'automatiser la tâche d'observation afin de pouvoir contrôler, en un temps réduit, un grand nombre de pièces de différentes formes et de différentes compositions.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Ce but est atteint au moyen d'un procédé de contrôle automatique non destructif de pièces mécaniques mettant en œuvre un système radiographique d'acquisition d'images, comportant les étapes suivantes :

- acquérir au moins une image réelle d'une pièce à contrôler susceptible de contenir des indications de défauts potentiels,

- effectuer un recalage 2D-3D d'un modèle 3D de la pièce à contrôler de manière à estimer la pose 3D de ladite pièce lors de l'acquisition de ladite image réelle,

- simuler les conditions opératoires d'acquisition de l'image réelle de la pièce à contrôler à partir de la pose 3D estimée de ladite pièce pour générer une image de référence sans défauts de ladite pièce,

- générer, au moyen d'un module de traitement d'images, pour chaque pixel de l'image réel un premier vecteur de caractéristiques qui décrit le pixel et son voisinage et pour chaque pixel de l'image de référence un deuxième vecteur de caractéristiques,

- comparer le vecteur de caractéristiques de chaque pixel de l'image réelle au vecteur de caractéristiques du pixel correspondant de l'image de référence

générée, ladite comparaison utilisant une mesure de similarité entre les deux vecteurs, par exemple la distance Euclidéenne, la norme 1 du vecteur différence entre les deux vecteurs, la distance de Mahalanobis...

-déduire une carte de défauts de la pièce contrôlée à partir de la
5 comparaison desdits vecteurs de caractéristiques de pixels d'image.

Selon l'invention, lesdits vecteurs caractéristiques d'image sont obtenus par calcul de descripteurs d'image au niveau de chaque pixel estimés par un apprentissage profond à base de réseaux de neurones convolutionnels de l'image réelle et de l'image de référence.

10 Le procédé selon l'invention comporte en outre les étapes suivantes :

-constituer une base de données comportant une pluralité de paires
d'images réelles et d'images de référence correspondantes,

-localiser un potentiel défaut sur l'image réelle,

15 -constituer une base de données comportant une pluralité de paires
d'images réelles et d'images de référence correspondantes,

-localiser manuellement un potentiel défaut sur l'image réelle,

20 -réaliser un apprentissage statistique supervisé qui prend en entrée un
ensemble de triplets constitués de l'image réelle, l'image de référence générée et les
positions des défauts dans l'image réelle et un réseau de neurones convolutionnel
profond et qui génère un réseau de neurones optimisé qui permet de calculer un vecteur
caractéristique d'image au niveau de chaque pixel et une métrique qui permet d'estimer
l'écart entre deux vecteurs caractéristiques de pixels.

25 L'apprentissage statistique peut être réalisé soit par des réseaux de
neurones à convolutions siamois partageant les mêmes poids à apprendre, soit par des
réseaux pseudo-siamois en parallèle ayant des poids à apprendre indépendants, ou
encore par un réseau à deux canaux d'entrée parallèles par couche de convolution.

Le procédé selon l'invention est mis en œuvre par un dispositif de
contrôle automatique non destructif de pièces mécaniques mettant en œuvre un système
radiographique d'acquisition d'images, comportant :

-des moyens pour acquérir au moins une image réelle d'une pièce à contrôler susceptible de contenir des indications de défauts potentiels,

-des moyens pour effectuer un recalage 2D-3D d'un modèle 3D de la pièce à contrôler de manière à estimer la pose 3D de ladite pièce lors de l'acquisition de ladite image réelle,

-des moyens pour simuler les conditions opératoires d'acquisition de l'image réelle de la pièce à contrôler à partir de la pose 3D estimée de ladite pièce pour générer une image de référence sans défauts de ladite pièce,

-des moyens pour générer, au moyen d'un module de traitement d'images, pour chaque pixel de l'image réel un premier vecteur de caractéristiques qui décrit le pixel et son voisinage et pour chaque pixel de l'image de référence un deuxième vecteur de caractéristiques,

-des moyens pour comparer le vecteur de caractéristiques de chaque pixel de l'image réelle au vecteur de caractéristiques du pixel correspondant de l'image de référence générée par calcul de mesure de similarité entre les deux vecteurs,

-des moyens pour déduire une carte de défauts de la pièce contrôlée à partir de la comparaison desdits vecteurs de caractéristiques de pixels d'image. Le dispositif selon l'invention comporte en outre:

-une base de données comportant une pluralité de paires d'images réelles et d'images de référence correspondantes,

-un module d'apprentissage statistique supervisé qui optimise les paramètres du réseau de neurones convolutionnel profond.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description qui va suivre, prise à titre d'exemple non limitatif, en référence aux figures annexées dans lesquelles:

- La figure 1 représente un système d'acquisition d'image à rayons X utilisé pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention ;

- la figure 2 illustre schématiquement une vue partielle d'une pièce à contrôler et son image radiographique ;
- la figure 3 illustre schématiquement une superposition de deux images radiographiques de la même vue mais de deux acquisitions différentes ;
- 5 - la figure 4 illustre schématiquement les différents référentiels de la scène d'acquisition d'une image réelle de la pièce à contrôler;
- la figure 5 illustre schématiquement la projection d'un point 3D de l'image réelle en un point 2D ;
- La figure 6 illustre schématiquement le processus de recalage utilisé dans le
10 procédé selon l'invention ;
- La figure 7 illustre schématiquement l'extraction de structures de forme cylindroïdes à partir de la CAO dont les barycentres sont utilisés comme points d'intérêt 3D ;
- la figure 8 illustre schématiquement un premier mode de réalisation des étapes du
15 procédé selon l'invention ;
- la figure 9 représente schématiquement un mode préféré de mise en œuvre des étapes du procédé selon l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

20 La figure 1 représente un système d'acquisition d'image à rayons X utilisé pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention comportant une source 2 à rayons X qui envoie des rayons X percuter la pièce 4 prélevée à partir d'un chariot, un détecteur 6 qui quantifie l'énergie restante des rayons X après avoir traversé la pièce 4, un bras robotisé 8 destiné à placer la pièce 4 entre la source à rayons 2 et le détecteur 6
25 sous un angle de vue prédéterminé. Le système d'acquisition d'image à rayons X permet d'obtenir une image réelle 10 d'une pièce à contrôler 4 susceptible de contenir des indications de défauts potentiels, comme cela est illustré par la figure 2. Nous disposons aussi d'un maillage triangulaire 3D de la pièce à contrôler, c'est-à-dire un ensemble de coordonnées 3D des sommets des triangles qui forment le maillage et la connectivité
30 entre les sommets qui définit la topologie du maillage. Ce maillage est récupérable à

partir de la conception de la géométrie de la pièce faite sur le logiciel CATIA® par exemple.

L'image réelle 10 de la pièce à contrôler 4 peut contenir de potentielles indications d'anomalies telles que par exemple la présence de corps étrangers plus dense ou moins dense, de retassures, d'inclusions, de résidus ou d'oxydes de sous ou sur épaisseurs de la pièce. Afin de mettre en surbrillance automatiquement les positions dans l'image des potentielles anomalies, le bras robotisé 8 du système d'acquisition place automatiquement chaque pièce 4 entre la source 2 et le détecteur 6 du système RX selon une position unique prédéterminée. Cependant en comparant les images produites de la même vue de plusieurs pièces, une variabilité dans la position spatiale des points 11, 13 de la pièce entre les deux images peut apparaître comme cela est illustré par la figure 3. Cette variabilité peut résulter du fait que le robot du système d'acquisition peine au départ à saisir la pièce depuis le chariot. Plusieurs tentatives pour saisir la pièce sont parfois nécessaires. En outre, le robot ne saisit pas toutes les pièces de la même manière. Une fois la pièce saisie, le robot se déplace très rapidement et s'arrête brusquement au point d'arrivée, ce qui induit une imprécision sur les coordonnées du point d'arrivée.

Pour pallier à cet inconvénient, le procédé selon l'invention permet de recalculer les données CAO provenant du fichier Catia de la pièce à contrôler par rapport à la vue 2D de la pièce acquise par le système à rayons X. Ce recalage est obtenu par une estimation de la transformation rigide en espace 3D (rotation et translation) à appliquer sur la CAO qui permet de la placer dans le repère du système d'acquisition ou était positionnée la vraie pièce lors de l'acquisition. Ensuite, une simulation du tir des rayons X sur le modèle 3D recalculé est réalisée en tenant compte des paramètres du système d'acquisition de manière à générer une image similaire à l'image acquise par le système d'acquisition d'image.

Pour réaliser la modélisation de la géométrie du système d'acquisition RX, il est nécessaire de définir les différents référentiels et les transformations (connues ou inconnues) entre ces référentiels.

La figure 4 illustre schématiquement les étapes de cette modélisation. Celle-ci comporte les trois étapes suivantes :

- définition du référentiel rattaché à la CAO de la pièce appelé “World Coordinate” en anglais (WCS),
- définition de la source des rayons X correspondant à l’origine du CCS (Camera Coordinate System). Ce dernier coïncide avec le centre optique d’acquisition RX,
- projection en perspective d’un point M sur le plan de projection.

Comme cela est illustré par la figure 4, les coordonnées 3D d’un sommet « M » de la CAO de la pièce sont désignés par (X, Y, Z) dans le WCS. La CAO a été prétraitée de telle sorte que son centre (barycentre de tous les sommets qui forment la pièce) coïncide avec l’origine O du repère WCS, et les principaux axes de la CAO coïncident avec (X, Y, Z).

L’origine du CCS (Camera Coordinate System) coïncide avec le centre optique du système qui correspond à la source des rayons X. Les coordonnées du point «M» dans ce repère s’expriment suivant les axes $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ avec l’axe $\bar{Z}$ coïncidant avec l’axe optique (le rayon X qui provient de la source parvient au centre du détecteur). Dans ce repère, le plan du détecteur est défini par l’équation $\bar{Z} = f$, où f est la distance focale du système (paramètre d’entrée connue qui correspond à la distance entre la source et le détecteur). Il existe alors une transformation rigide entre le WCS et CCS qui permet de transformer les coordonnées du point M dans le repère CCS en coordonnées dans le repère WCS. On peut représenter cette transformation rigide par un vecteur de translation et une matrice de rotation.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}.$$

Les 3 paramètres de rotation et de translation permettent de déterminer la pose de la CAO dans le repère CCS. Ces paramètres, qui sont les inconnues de la modélisation, sont estimés par le recalage.

La projection en perspective du point M sur le plan de projection est le point 2D « m » qui est représenté par $(\bar{x}, \bar{y})$ dans un nouveau référentiel 2D appelé PCS (projection Coordinate System). Les axes $(\bar{x}, \bar{y})$ de ce repère sont parallèles aux axes $(\bar{X}, \bar{Y})$. Pour trouver la relation entre les deux repères CCS et PCS, nous appliquons le

théorème de Thalès sur le triangle dont les sommets sont « C » (la source) « o » (le centre du repère PCS) et « m » (projection du point M) comme cela est illustré par la figure 5.

Nous obtenons ainsi la relation suivante :

$$\frac{Z}{f} = \frac{Y}{y} = \frac{X}{x},$$

5 En passant à la notation matricielle et en passant aux coordonnées homogènes, nous pouvons écrire :

$$Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}.$$

10 Finalement, nous introduisons le repère 2D ICS (Image Coordinate System) pour représenter les coordonnées du pixel (u, v) dans l'image numérique produite par le système à rayons X. Puisque le détecteur 6 utilisé est un panneau plat (flat panel), on peut représenter la transformation entre les repères PCS et ICS par un modèle linéaire comme suit:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & s & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

15 Les paramètres de ce modèle sont les facteurs d'agrandissement (k_u, k_v) dans chaque direction, une translation de l'origine (u_0, v_0) , qui représente la projection du point $(x, y) = (0, 0)$ dans le ICS et un facteur oblique qui modélise un repère non orthogonal (dans notre cas, $s=0$ car nos axes (u, v) sont bien orthogonales). La relation entre les deux ensembles de données d'entrée, c'est-à-dire, les coordonnées 3D
20 (X, Y, Z) des points dans le repère WCS et les coordonnées 2D (u, v) de leurs projections respectives dans le ICS Sont décrites ci-après.

Cette relation s'écrit avec le système linéaire S1 suivant :

$$\lambda_p \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & s & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{R}_p & \mathbf{t}_p \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_p} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix},$$

Les inconnues dans ce système sont la translation et la rotation $\mathbf{R}_p \mathbf{t}_p$

Il existe plusieurs méthodes pour faire le recalage 2D 3D. La publication "Markelj P1 et al. A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions. Medical Image Analysis, 2012" fait un état de l'art des méthodes du recalage 2D 3D :

Le procédé selon l'invention s'appuie, à titre d'exemple non limitatif, sur une approche basée sur l'appariement de points d'intérêt dans laquelle des points particuliers sont considérés comme amers de recalage qui vont permettre de trouver la transformation rigide à appliquer sur la CAO. Des points en 3D sur la CAO sont alors définis et points en 2D sont détectés automatiquement à partir de l'image. Le recalage consiste à appliquer une transformation rigide sur les points 3D de telle sorte que la projection de ces points 3D colle avec les points 2D.

Comme cela est illustré par la figure 6 illustrant schématiquement l'approche du recalage utilisé dans le procédé selon l'invention, l'étape 14 consiste à extraire des points 2D de l'image, l'étape 15 consiste à étiqueter les points 2D extraits ; Ces derniers sont mis en correspondance avec des points 3D préalablement extraits de la CAO à l'étape 16. L'étape 17 consiste à estimer la transformation rigide, par exemple, par la méthode PNP « PNP : Perspective N Points » décrite notamment dans Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proc. ASP/UI Symp. Close-Range Photogrammetry, 1971. C.-P. Lu, G. D. Hager, and E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images. T PAMI 2000.

Extraction des points 3D de la CAO

Ce traitement n'est fait qu'une seule fois sur la CAO. Le but est de déterminer les coordonnées (x, y, z) des points 3D qui seront utilisés comme amers de

recalage. Ces points 3D peuvent être les centres de structures particulières 10 de la CAO comme cela est illustré schématiquement par la figure 7. Ils peuvent être alors calculés comme étant le barycentre du polygone qui forme la structure. Les structures particulières de la CAO sont isolées et le barycentre de chaque structure est alors calculé.

- 5 On obtient ainsi les coordonnées des centres des structures sur la CAO à recalculer. Le but est d'utiliser ces points 3D particuliers comme amers de recalage.

Détection des centres des structures sur les images radiographiques

- Pour détecter les points d'intérêt sur l'image 2D, le procédé selon l'invention s'appuie sur une méthode décrite dans la demande de brevet « Contrôle non destructif de pièces aéronautiques par un système de radiographie » déposé le 20 Mars 10 2017 sous le numéro n° FR 1772283.

Estimation des paramètres de la rotation et translation

- Le système linéaire $S1$ a douze inconnues (matrice rotation R_p de dimension 3×3 et vecteur translation T_p de dimension 3×1). La connaissance des coordonnées 3D (X, Y, Z) d'un point et les coordonnées (u, v) de sa projection permet d'avoir trois équations. Il faut donc au moins quatre points 3D et leurs projections associées pour pouvoir résoudre ce système à douze inconnues. Cependant il est préférable d'avoir plus que quatre points pour introduire de la redondance dans les données et être moins sensible au bruit qui peut s'introduire dans les coordonnées des points. La méthode utilisée dans le procédé selon l'invention pour résoudre ce système linéaire est décrite dans « Vincent Lepetit, Francesc Moreno-Noguer, and Pascal Fua. (2009). EPnP: An Accurate $O(n)$ Solution to the PnP Problem. International Journal of Computer Vision ». Cependant il existe dans la littérature une panoplie de méthodes itératives et non itératives pour résoudre ce problème. A titre d'exemple, citons les publications les suivantes : « Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proc. ASP/UI Symp. Close-Range Photogrammetry, 1971. C.-P. Lu, G. D. Hager, and E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images. T PAMI 2000. »
- 15
20
25
30

En fonctionnement, la pièce à contrôler 2 est positionnée par un bras robotisé entre une source rayons X et un détecteur 6 sous un angle de vue prédéterminé. La source envoie des rayons X qui percutent la pièce 2, et le détecteur quantifie l'énergie restante des rayons X après avoir traversé la pièce 2.

5 Ce mode opératoire est simulé par le module de calcul pour générer une image de référence sans défauts à partir du maillage triangulaire 3D de la pièce 2, c'est-à-dire d'un ensemble de coordonnées 3D des sommets des triangles qui forment le maillage et la connectivité entre les sommets qui définit la topologie du maillage. Ce maillage est récupérable, par exemple, à partir de la conception de la géométrie de la
10 pièce qui peut être faite au moyen du logiciel CATIA® par exemple, comme cela est expliqué ci-dessus.

La détection de défaut sur une pièce est ensuite réalisée par comparaison de l'image de la pièce 2 obtenue par le système d'acquisition à rayons X et l'image simulée à partir du maillage triangulaire 3D de la pièce 2.

15 En référence à la figure 8, une image réelle 20 de la pièce à contrôler 2 obtenue par le système d'acquisition à rayons X et une image de référence 22, sans défauts, obtenue à partir d'un maillage triangulaire 3D de la pièce 2 sont enregistrées dans une mémoire module de calcul. Au préalable, afin de s'affranchir des écarts géométriques dus à la variabilité de la position spatiale de la pièce 2 lors de son
20 positionnement par le robot, les coordonnées 3D de l'image de référence 22 sont recalées numériquement sur la position de la pièce dans le repère radiographique utilisé lors de l'acquisition de l'image réelle 20. L'image réelle 20 et l'image de référence 22 sont ensuite fournies au module de traitement d'images 24 qui génère un premier vecteur V1 de caractéristiques/descripteurs d'image au niveau de chaque pixel de l'image réelle 20
25 et un deuxième vecteur V2 de caractéristiques/descripteurs d'image au niveau de chaque pixel de l'image de référence 22. Les vecteurs V1 et V2 sont fournis au module de comparaison 26 pour effectuer une comparaison pixel par pixel en calculant des caractéristiques d'image, préalablement déterminée par apprentissage statistique, et une valeur de mesure de similarité spécifique à l'application. La mesure de similarité peut être
30 par exemple une distance Euclidéenne, une norme 1 du vecteur différence entre les deux

vecteurs ou une distance de Mahalanobis...). Les positions de défauts auront des valeurs de similarité différentes de celles des zones saines.

Les étapes du procédé sont décrites en référence à la figure 9.

Comme on peut le voir sur la figure 9, le procédé selon l'invention
5 comporte une phase d'apprentissage statistique supervisée qui permet au module de calcul d'apprendre caractéristiques/descripteurs d'image au niveau de chaque pixel de l'image de référence 22 et son voisinage restreint (patch ou imagerie) et la mesure de similarité entre les caractéristiques de chaque pair de patches, pour détecter la présence d'un défaut au niveau de patch de l'image à contrôler.

10 Notons qu'initialement, une base d'images réelles annotées est constituée dans laquelle de potentiels défauts sont préalablement localisés sur chacune de ces images réelles par des experts. La base d'images réelles est ensuite augmentée par des images de références simulées qui ne contiennent pas de défaut. Pour chaque image réelle une image de référence correspondante est générée à partir du recalage du modèle
15 3D et ensuite par simulation.

A l'étape 30 (respectivement l'étape 32), des données numériques issues de la CAO (Conception assistées par ordinateur) (respectivement des images d'apprentissage sont extraites de la mémoire du module de calcul.

20 A l'étape 34, les données numériques issues de la CAO (représentant l'ensemble de coordonnées de l'image de la pièce 20 sont extraites d'un modèle 3D de cette pièce) sont alignées sur les images d'apprentissage.

A l'étape 36, les coordonnées de l'image de la pièce 20 extraites du modèle 3D sont recalées numériquement sur l'espace 3D de l'image de référence.

25 Les coordonnées recalées numériquement sur l'espace 3D de l'image de référence sont fournies à un simulateur du système d'acquisition associé au module de calcul qui génère, à l'étape 38, l'image de référence 22.

A l'étape 40, le module de calcul extrait des vecteurs caractéristiques/descripteurs d'image au niveau de chaque pixel de caractéristiques respectivement de l'image d'apprentissage et de l'image de référence.

A l'étape 42, les vecteurs subissent un traitement destiné à déterminer les pertes de l'apprentissage par rapport à une carte de défauts réels de l'image 44. Les vecteurs subissent une optimisation 46 qui génère des paramètres qui sont injectés dans la phase de test.

5 L'apprentissage statistique consiste à optimiser les paramètres du réseau de neurones qui permettent de minimiser la perte d'apprentissage représentant la différence entre l'annotation manuelle et la prédiction du réseau de neurones.

Le vecteur caractéristique d'un pixel est le résultat de convolutions appliqué sur ce pixel et son voisinage.

10 Le procédé selon l'invention permet ainsi d'automatiser la tâche d'observation afin de pouvoir contrôler, en un temps réduit, un grand nombre de pièces de différentes formes et de différentes compositions.

REVENDICATIONS

1. Procédé de contrôle automatique non destructif de pièces mécaniques (4) mettant en œuvre un système radiographique d'acquisition d'images, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

-acquérir au moins une image réelle (20) d'une pièce à contrôler (4) susceptible de contenir des indications de défauts potentiels,

-effectuer un recalage 2D-3D d'un modèle 3D de la pièce à contrôler (4) de manière à estimer la pose 3D de ladite pièce lors de l'acquisition de ladite image réelle (20),

-simuler les conditions opératoires d'acquisition de l'image réelle (20) de la pièce à contrôler (4) à partir de la pose 3D estimée de ladite pièce pour générer une image de référence (22) sans défauts de ladite pièce,

-générer, au moyen d'un module de traitement d'images (24), pour chaque pixel de l'image réel (20) un premier vecteur de caractéristiques qui décrit le pixel et son voisinage et pour chaque pixel de l'image de référence (22) un deuxième vecteur de caractéristiques,

-comparer le vecteur de caractéristiques de chaque pixel de l'image réelle (20) au vecteur de caractéristiques du pixel correspondant de l'image de référence (22) générée, ladite comparaison utilisant une mesure de similarité entre les deux vecteurs,

-déduire une carte de défauts de la pièce contrôlée à partir de la comparaison desdits vecteurs de caractéristiques de pixels d'image.

2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel lesdits vecteurs caractéristiques d'image sont obtenus par calcul de descripteurs d'image au niveau de chaque pixel estimés par un apprentissage profond à base de réseaux de neurones convolutionnels de l'image réelle et de l'image de référence.

3. Procédé selon la revendication 2 comportant en outre les étapes suivantes :

-constituer une base de données comportant une pluralité de paires d'images réelles et d'images de référence correspondantes,

5 -localiser manuellement un potentiel défaut sur l'image réelle,
 -réaliser un apprentissage statistique supervisé qui prend en entrée un ensemble de triplets constitués de l'image réelle (20), l'image de référence (22) générée et les positions des défauts dans l'image réelle et un réseau de neurones convolutionnel profond et qui génère un réseau de neurones optimisé qui permet de calculer un vecteur
10 caractéristique d'image au niveau de chaque pixel et une métrique qui permet d'estimer l'écart entre deux vecteurs caractéristiques de pixels.

4. Procédé selon la revendication 2 caractérisé en ce que l'apprentissage statistique est réalisé par des réseaux siamois en parallèle partageant les mêmes poids à
15 apprendre.

5. Procédé selon la revendication 2 caractérisé en ce que l'apprentissage statistique est réalisé par des réseaux pseudo-siamois en parallèle ayant des poids à apprendre indépendants.
20

6. Procédé selon la revendication 2 caractérisé en ce que l'apprentissage statistique est réalisé par un réseau à deux canaux d'entrée par couche de convolution.

7. Dispositif de contrôle automatique non destructif de pièces
25 mécaniques mettant en œuvre un système radiographique d'acquisition d'images, caractérisé en ce qu'il comporte:

-des moyens pour acquérir au moins une image réelle (20) d'une pièce (4) à contrôler susceptible de contenir des indications de défauts potentiels,

-des moyens pour effectuer un recalage 2D-3D d'un modèle 3D de la pièce à contrôler de manière à estimer la pose 3D de ladite pièce lors de l'acquisition de ladite image réelle (20),

5 -des moyens pour simuler les conditions opératoires d'acquisition de l'image réelle (20) de la pièce (4) à contrôler à partir de la pose 3D estimée de ladite pièce pour générer une image de référence (22) sans défauts de ladite pièce,

-des moyens pour générer, au moyen d'un module de traitement d'images (24), un premier vecteur de caractéristiques d'image à partir de l'image réelle (20) et un deuxième vecteur de caractéristiques d'image à partir de l'image de référence
10 (22),

-des moyens pour comparer les vecteurs de caractéristiques d'image générés par calcul de mesure de similarité entre les deux vecteurs,

-des moyens pour déduire une carte de défauts de la pièce contrôlée à partir de la comparaison desdits vecteurs de caractéristiques d'image.
15

8. Dispositif selon la revendication 6 caractérisé en ce qu'il comporte en outre:

-une base de données comportant une pluralité de paires d'images réelles et d'images de référence correspondantes,
20 -un module d'apprentissage statistique supervisé qui optimise les paramètres du réseau de neurones convolutionnel profond.

9. Programme d'ordinateur mémorisé sur un support d'enregistrement et comportant des instructions pour réaliser les étapes du procédé lorsqu'il est exécuté
25 sur un ordinateur.

10. Support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.
30

1 / 5

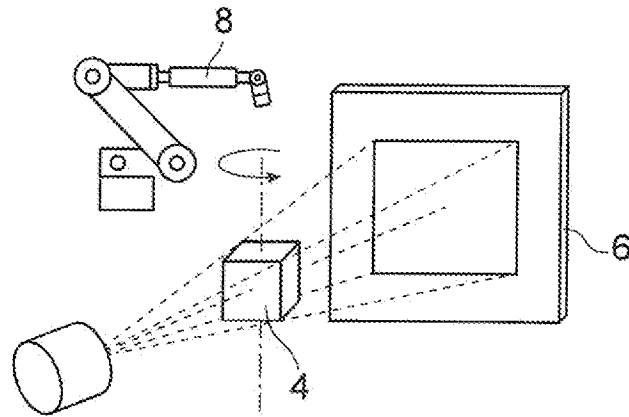


FIG. 1

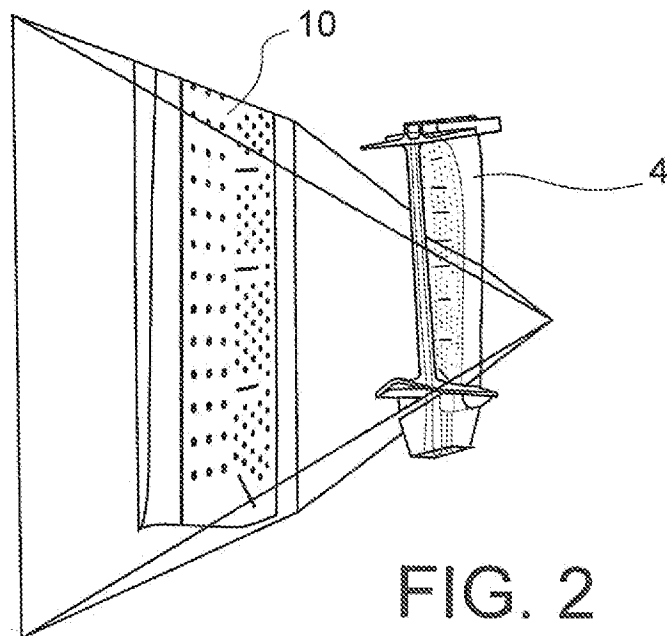


FIG. 2

2 / 5

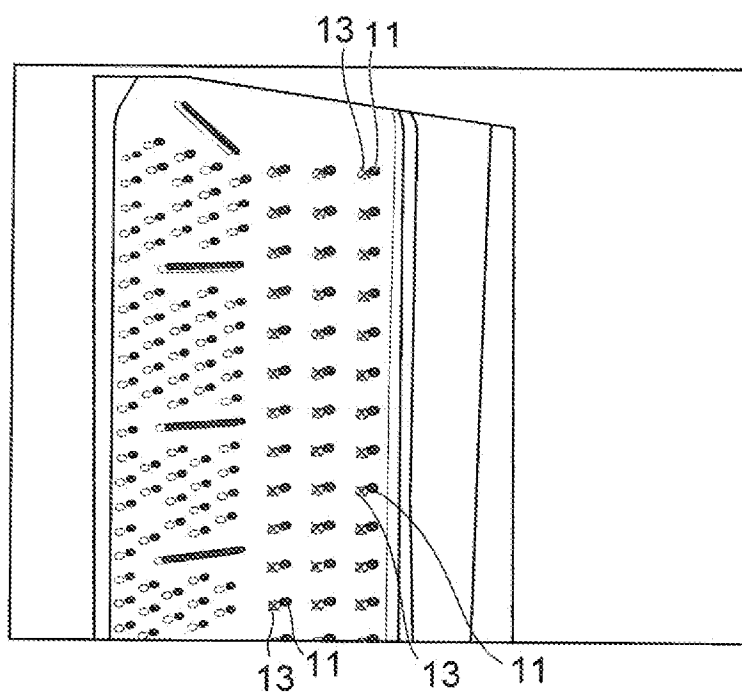


FIG. 3

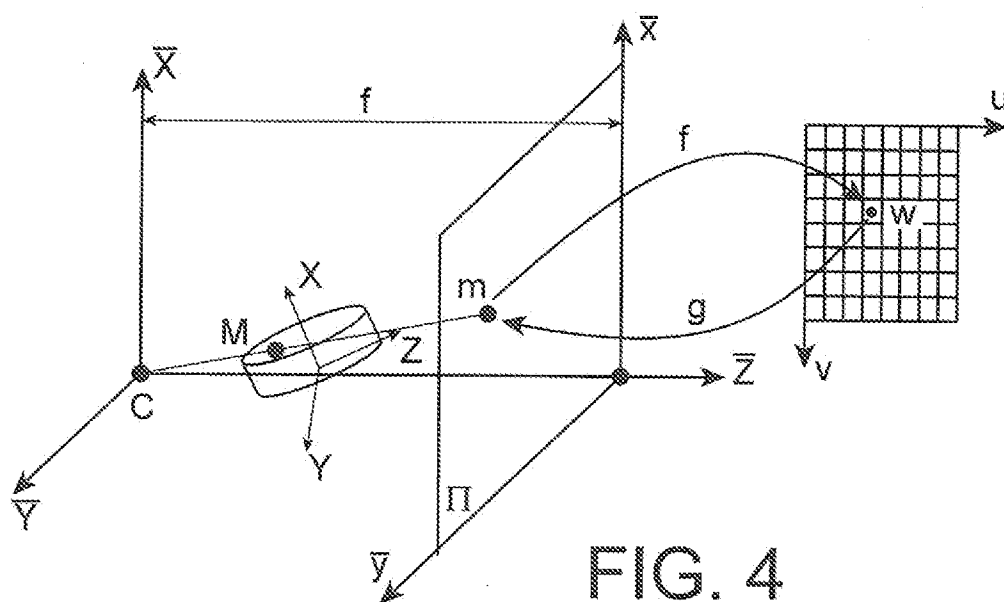


FIG. 4

3 / 5

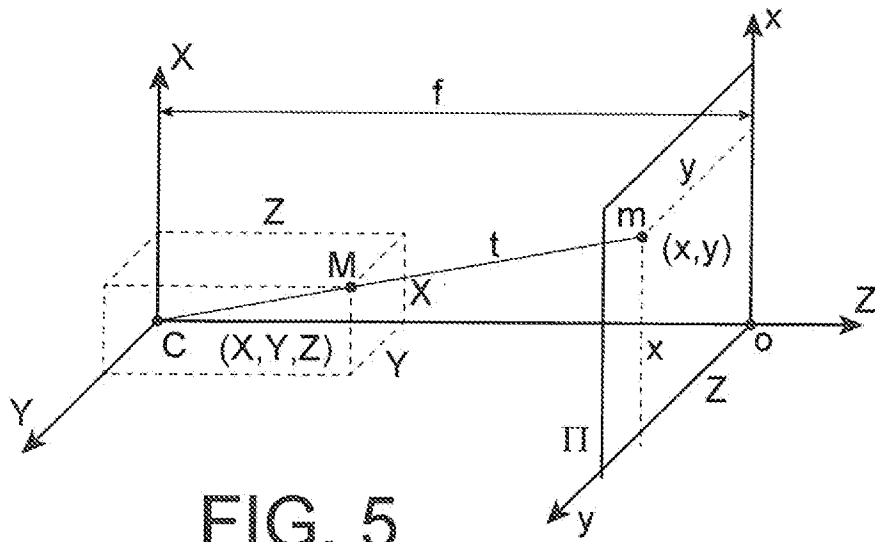


FIG. 5

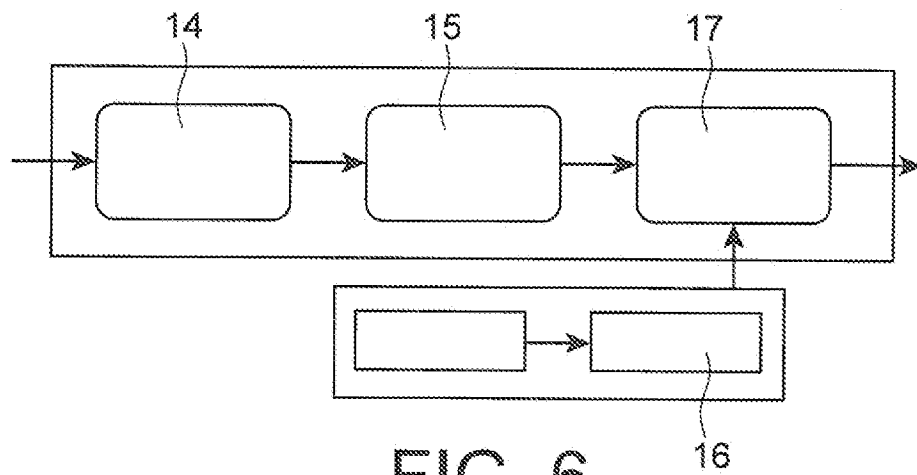


FIG. 6

4 / 5

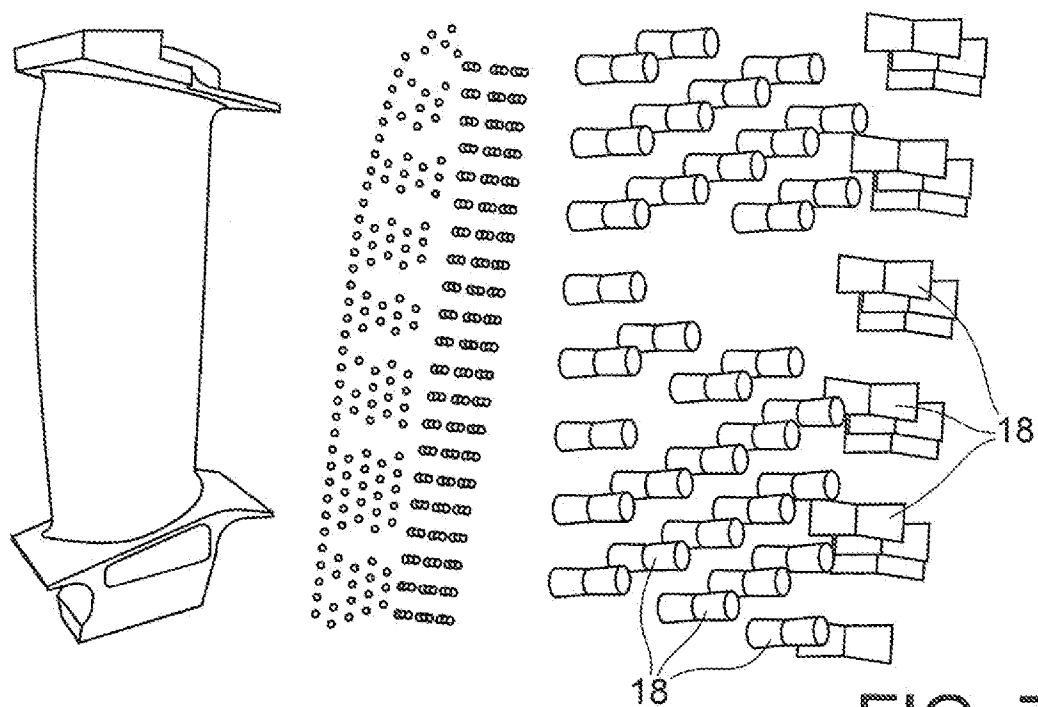


FIG. 7

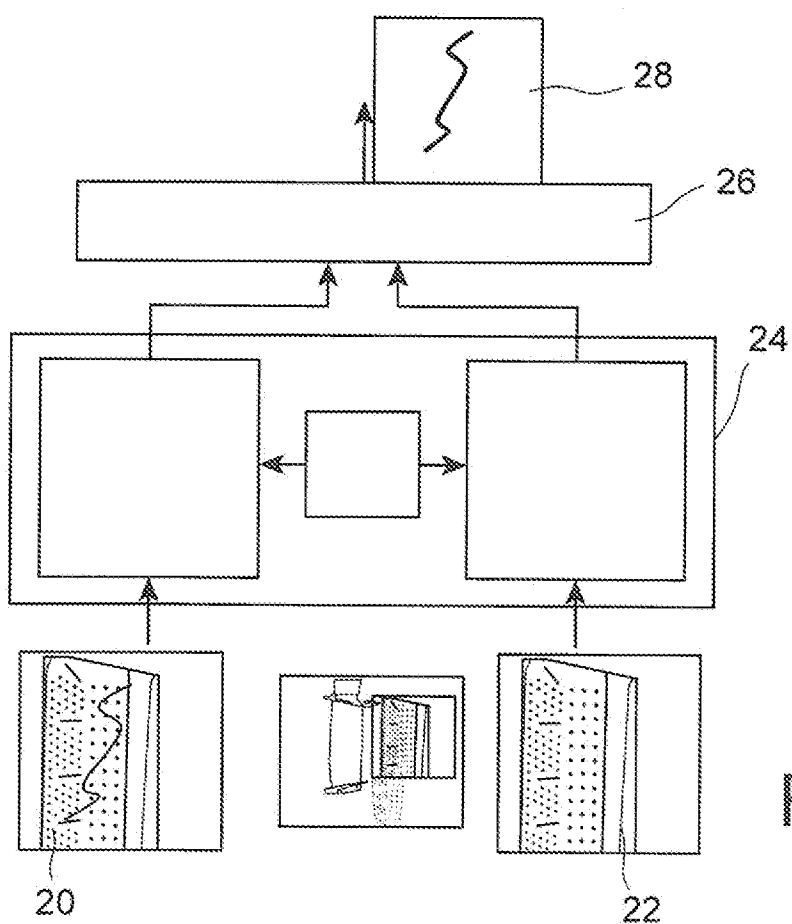


FIG. 8

5 / 5

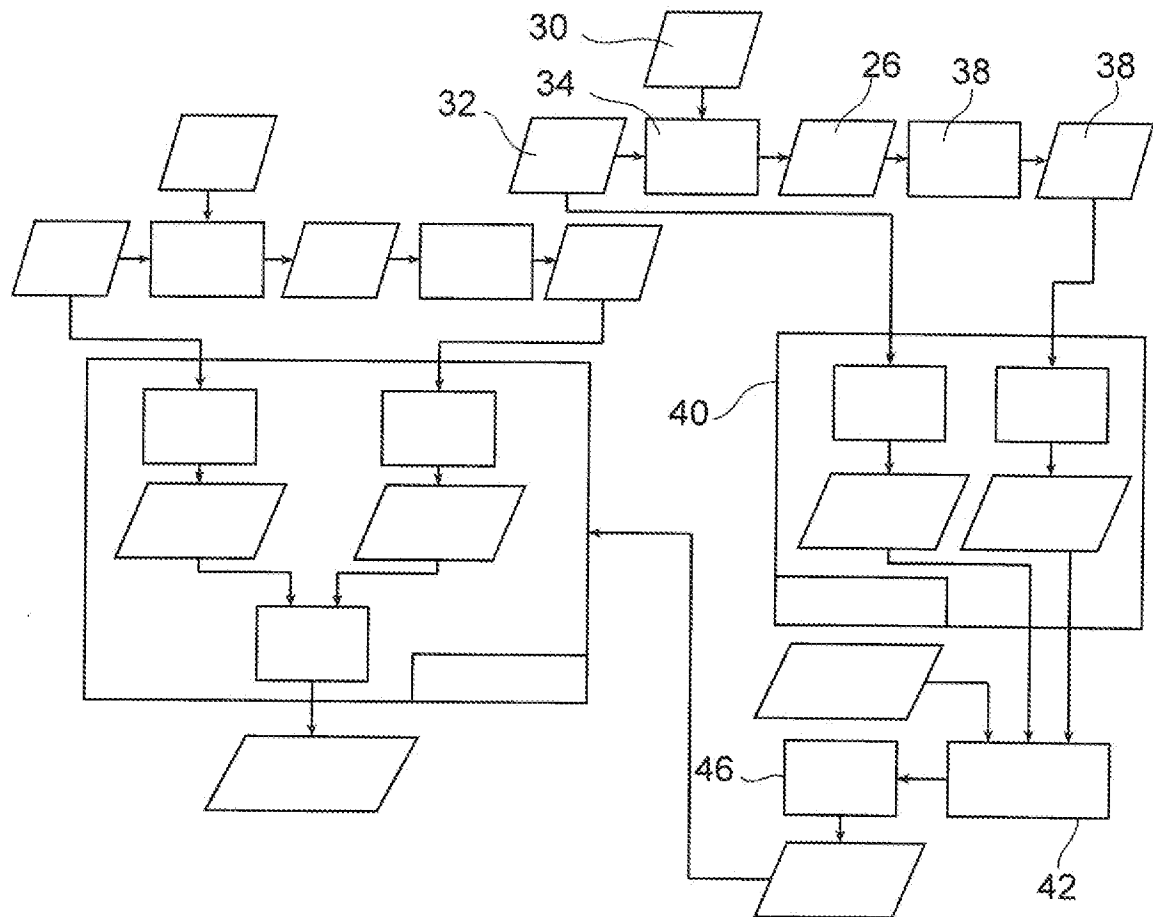


FIG. 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/052024

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G06T7/00
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

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, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2010/220910 A1 (KAUCIC ROBERT AUGUST [US] ET AL) 2 September 2010 (2010-09-02) abstract paragraph [0013]; figure 1 paragraph [0018] - paragraph [0022]; figures 2, 3	1-10
Y	US 2002/054694 A1 (VACHTSEVANOS GEORGE J [US] ET AL) 9 May 2002 (2002-05-09) paragraph [0022] - paragraph [0025]; figure 26 paragraph [0059] paragraph [0099] - paragraph [0114] paragraph [0135] - paragraph [0158] paragraph [0188] - paragraph [0189] ----- -/-	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

5 October 2018

Date of mailing of the international search report

17/10/2018

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

Błaszczuk, Marek

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/052024

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2017/200260 A1 (BHASKAR KRIS [US] ET AL) 13 July 2017 (2017-07-13) the whole document -----	1-10
A	EP 0 667 215 A1 (THOMSON BROADBAND SYSTEMS [FR]) 16 August 1995 (1995-08-16) the whole document -----	1-10
A	EP 0 580 481 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 26 January 1994 (1994-01-26) the whole document -----	1-10
A	WO 2016/090044 A1 (KLA TENCOR CORP [US]) 9 June 2016 (2016-06-09) the whole document -----	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2018/052024

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010220910	A1	02-09-2010	NONE
US 2002054694	A1	09-05-2002	NONE
US 2017200260	A1	13-07-2017	CN 108475350 A 31-08-2018 KR 20180094121 A 22-08-2018 TW 201734888 A 01-10-2017 US 2017200260 A1 13-07-2017 WO 2017123553 A1 20-07-2017
EP 0667215	A1	16-08-1995	EP 0667215 A1 16-08-1995 FR 2715599 A1 04-08-1995
EP 0580481	A1	26-01-1994	EP 0580481 A1 26-01-1994 FR 2693813 A1 21-01-1994
WO 2016090044	A1	09-06-2016	CN 107408209 A 28-11-2017 JP 2018506168 A 01-03-2018 KR 20170091716 A 09-08-2017 SG 11201704384T A 29-06-2017 US 2016163035 A1 09-06-2016 WO 2016090044 A1 09-06-2016

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2018/052024

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06T7/00 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		
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, INSPEC, WPI Data		
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 2010/220910 A1 (KAUCIC ROBERT AUGUST [US] ET AL) 2 septembre 2010 (2010-09-02) abrégé alinéa [0013]; figure 1 alinéa [0018] - alinéa [0022]; figures 2, 3 -----	1-10
Y	US 2002/054694 A1 (VACHTSEVANOS GEORGE J [US] ET AL) 9 mai 2002 (2002-05-09) alinéa [0022] - alinéa [0025]; figure 26 alinéa [0059] alinéa [0099] - alinéa [0114] alinéa [0135] - alinéa [0158] alinéa [0188] - alinéa [0189] -----	1-10
A	US 2017/200260 A1 (BHASKAR KRIS [US] ET AL) 13 juillet 2017 (2017-07-13) le document en entier ----- -/--	1-10
☒ 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 5 octobre 2018		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 17/10/2018
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 Błaszczuk, Marek

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 667 215 A1 (THOMSON BROADBAND SYSTEMS [FR]) 16 août 1995 (1995-08-16) le document en entier -----	1-10
A	EP 0 580 481 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 26 janvier 1994 (1994-01-26) le document en entier -----	1-10
A	WO 2016/090044 A1 (KLA TENCOR CORP [US]) 9 juin 2016 (2016-06-09) le document en entier -----	1-10

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2018/052024

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2010220910	A1	02-09-2010	AUCUN	
US 2002054694	A1	09-05-2002	AUCUN	
US 2017200260	A1	13-07-2017	CN 108475350 A	31-08-2018
			KR 20180094121 A	22-08-2018
			TW 201734888 A	01-10-2017
			US 2017200260 A1	13-07-2017
			WO 2017123553 A1	20-07-2017
EP 0667215	A1	16-08-1995	EP 0667215 A1	16-08-1995
			FR 2715599 A1	04-08-1995
EP 0580481	A1	26-01-1994	EP 0580481 A1	26-01-1994
			FR 2693813 A1	21-01-1994
WO 2016090044	A1	09-06-2016	CN 107408209 A	28-11-2017
			JP 2018506168 A	01-03-2018
			KR 20170091716 A	09-08-2017
			SG 11201704384T A	29-06-2017
			US 2016163035 A1	09-06-2016
			WO 2016090044 A1	09-06-2016